

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛТЫХ СВЕРХГИГАНТОВ В ПОЛОСЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЦЕФЕИД

© 2017 г. И. А. Усенко<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Астрономическая обсерватория Одесского национального университета, Украина

<sup>2</sup>Николаевская астрономическая обсерватория, Украина

Поступила в редакцию 25.07.2016 г.

Спектры высокого разрешения девяти желтых непременных сверхгигантов (NVS), находящихся внутри канонической полосы неустойчивости цефеид, согласно Сэндэйджу и Тамманну (1969) ( $\alpha$  Aqr,  $\epsilon$  Leo,  $\mu$  Per,  $\omega$  Gem, BD+60 2532, HD 172365, HD187299, HD190113, HD200102), были получены на телескопах 1-м Цейсс и 6-м БТА САО РАН в 90-е годы XX в. По ним определены параметры атмосферы, химический состав, оценки лучевых скоростей, покраснений, светимостей, расстояний и радиусов. Спектроскопические оценки  $T_{\text{eff}}$  и светимости, определенные по параллаксам каталога HIPPARCOS, показали, что восемь из девяти исследуемых NVS на диаграмме  $T_{\text{eff}} - \lg(L/L_{\odot})$  находятся вне границ канонической полосы неустойчивости цефеид. При использовании границ полосы неустойчивости цефеид Боно и др. (2000) из NVS списка на диаграмме один находится внутри ПНЦ, но ближе к красной границе, два — на красной границе, три — за пределами красной границы, два — на голубой границе и один — за пределами голубой границы. Оценены эволюционные массы объектов. Значения содержаний  $\alpha$ -элементов, элементов  $r$ - и  $s$ -процессов для всех исследуемых объектов оказались близки к солнечным. Оценки CNO, Na, Mg и Al показали, что восемь из девяти NVS списка уже прошли фазу первого перемешивания. Литиевый сверхгигант HD 172365, судя по содержанию ключевых элементов и положению на диаграмме  $T_{\text{eff}} - \lg(L/L_{\odot})$ , находится на эволюционной стадии гравитационного сжатия гелиевого ядра после ГП и движется в направлении первого пересечения полосы неустойчивости цефеид.  $\epsilon$  Leo следует относить к ярким гигантам, тогда как HD 187299 и HD 190113, возможно, уже прошли стадию второго перемешивания и движутся на асимптотическую ветвь.

*Ключевые слова:* непременные желтые сверхгиганты, полоса неустойчивости цефеид, спектры, параметры атмосфер, покраснения, радиусы и светимости, химический состав, лучевые скорости, эволюционные модели, эволюционный статус.

DOI: 10.7868/S032001081704009X

### ВВЕДЕНИЕ

В 70-е годы прошлого века исследователи обратили внимание на группу желтых сверхгигантов спектральных классов F5–G8 Ib-II, расположенных внутри так называемой полосы неустойчивости цефеид (ПНЦ) и не показывающих значительных изменений блеска, показателей цвета и лучевых скоростей, — так называемых *pop-variable supergiants* (NVS). Впервые такую группу из 48 звезд выделили в своей работе Ферни и Хьюб (1971) и указали, что пять из них относятся к малоамплитудным цефеидам (DCEPS), а  $\epsilon$  Leo была заподозрена в переменности. Впоследствии Шмидт (1972) расширил этот список еще на 11 объектов, основываясь в своей работе на использовании границ так называемой канонической ПНЦ, из работы

Сэндэйджа и Тамманна (1969). На рис. 1 представлены положения NVS (жирные кружки) из данного списка на диаграмме  $T_{\text{eff}} - \lg(L/L_{\odot})$ . Расположение некоторых объектов вне канонической ПНЦ Сэндэйджа–Тамманна объяснялось погрешностями в определении значений  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg(L/L_{\odot})$ . Гипотеза о причинах отсутствия пульсационной активности у NVS было несколько. Кокс и др. (1973) объясняли явление низкой долей массы гелия в их внутренних частях, что было опровергнуто Уотсоном (1971) — в исследованных В-звездах (которые являются прародителями желтых сверхгигантов) не было обнаружено значительных различий в содержании гелия. Ллойд Эванс (1968) обнаружил среди DCEPS высокий процент двойных систем и предположил, что присутствие близкого спутника может быть причиной подавления пульсационной активности у NVS, находящихся внутри ПНЦ. В настоящее время обнаружение большого количества цефеид

\* Электронный адрес: igus99@ukr.net

(как DCEP, так и DCEPS) среди двойных систем ставит под сомнение предположение о влиянии спутника на их пульсационную активность. Шмидт и др. (1974) по оценкам  $T_{\text{eff}}$  (определенным по профилям H $\alpha$  и широкополосной фотометрии),  $\lg g$  и  $V_t$  попытались показать, что у цефеид значения  $\lg g$  больше, а  $V_t$  меньше, чем у NVS при тех же значениях  $T_{\text{eff}}$ . Одной из причин такого явления называлась потеря массы у цефеид. Однако Паттерсон и Нефф (1979) путем спектроскопических сравнений физических параметров цефеид и NVS, не обнаружили никаких различий между ними. Таким образом, феномен NVS внутри ПНЦ сводился к точности определений их оценок  $T_{\text{eff}}$  и светимостей.

В дальнейшем считалось, что NVS внутри ПНЦ — это замаскированные DCEPS (см. обзор в работе Ареллано Ферро, 1984). Поэтому многочисленные фотометрические и спектроскопические исследования (измерения лучевых скоростей) были направлены исключительно на выявление этих звезд (с амплитудами не более  $0.3 \text{ m/s}$  в фильтре  $V$ ). Хотя таких объектов было обнаружено относительно немного, но ими оказались весьма необычные переменные, четко разделенные на две группы: короткопериодические ( $1^{\text{d}}5 \leq P \leq 8^{\text{d}}5$ ) и долгопериодические ( $P > 40^{\text{d}}$ ). Первая группа — это пекулярные DCEPS (например, V473 Lyr,  $\alpha$  UMi и др.), а долгопериодические объекты не показывали регулярной переменности и скорее напоминали полуправильные переменные (SRV). Исследования первой группы звезд (определение основных физических параметров —  $T_{\text{eff}}$ , радиус, светимость, массы) показали, что DCEPS ничем не отличаются от обычных классических цефеид (DCEP) и NVS.

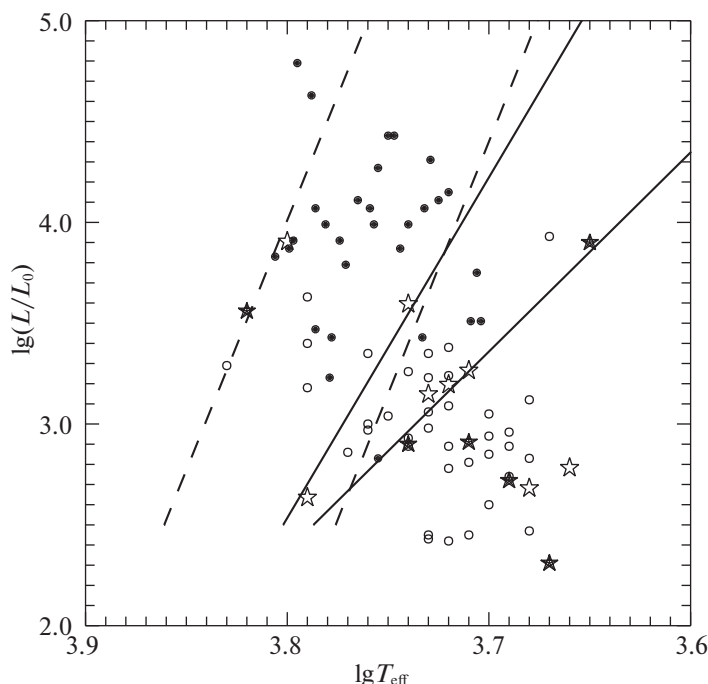
Обнаружение у многих желтых сверхгигантов эмиссионных компонент линий H и K CaII позволило установить для этих звезд зависимость  $W_\lambda(\text{K}) - \lg(L/L_\odot)$  (Вильсон, Баппу, 1957). При этом внимание было обращено на асимметрию и сдвиг K-компоненты в красную ( $\mu$  Per,  $\alpha$  Aqr) и синюю ( $\epsilon$  Leo,  $\omega$  Gem) области. Подобные эмиссии для этого класса звезд были обнаружены и у линий h и k MgII — это явление объяснялось наличием у них хромосферы и звездного ветра. Так как линии h и k MgII являются хорошим индикатором околозвездного поглощения, то следует упомянуть работу Дизи (1988), где показано, что сдвиг компонент поглощения линий h и k MgII, H и K CaII в синюю область как раз свидетельствуют о наличии звездного ветра и, как следствие, околозвездной оболочки. Были оценены потери массы и массы околозвездных оболочек как для цефеид, так и для NVS. Рассматривалась версия о влиянии потери массы на пульсационную активность этих звезд.

Тема присутствия околозвездных оболочек у желтых переменных и непеременных сверхгигантов является актуальной в наши дни, ибо позволяет заново пересмотреть некоторые положения теории эволюции звезд средних и больших масс. Так, в работе Усенко (2015) были исследованы три сверхгиганта в рассеянном скоплении NGC 129, один из которых впервые пересекал ПНЦ, обладал большей скоростью вращения и не показывал присутствия оболочки, тогда как у двух других (цефеиды внутри ПНЦ (DL Cas) и звезды за красной границей ПНЦ) оболочка присутствовала. У двух NVS из четырех, находящихся за красной границей ПНЦ, согласно Усенко и др. (2015), также было обнаружено свидетельство присутствия оболочки. Положение данных объектов на рис. 1 обозначено жирными звездочками. Было сделано предположение, что околозвездные оболочки у желтых сверхгигантов образуются после стадии первого перемешивания.

Химический состав NVS в ПНЦ исследовался для анализа градиента металличности Галактики (Лак, 2014). Эти объекты использовались для определения значений покраснений  $E_{B-V}$  и светимостей по калибровкам  $T_{\text{eff}}$ , полученным из отношений спектральных линий поглощения нейтральных атомов и ионов (Ковтюх и др., 2008, 2012) и расстояний из каталога HIPPARCOS. На рис. 1 положения NVS из списка Ферни—Хьюб—Шмидта, согласно оценкам  $T_{\text{eff}}$  Ковтюха и др. (2008) и светимостей, определенных с учетом значений  $A_V$  из работы Лака (2014) (кроме звезд, исследуемых в данной работе), обозначены пустыми кружками. Как следует из рис. 1, подавляющее большинство NVS находятся за красной границей вне канонической ПНЦ, и менее 30% расположены внутри ПНЦ из работы Боно и др. (2000). Отсюда следует важный вывод, что так называемый феномен NVS внутри ПНЦ может быть связан не только с точностью определений значений  $T_{\text{eff}}$  и светимости, но и с точными положениями границ ПНЦ. При этом вопрос о влиянии потери массы на отсутствие пульсационной активности NVS также остается открытым.

В данной работе проведены спектральные исследования нескольких NVS внутри ПНЦ, взятых из списка Ферни—Хьюб—Шмидта. При этом ставились следующие задачи:

1. Определение параметров атмосфер звезд и использование оценок  $T_{\text{eff}}$  для определения их избытков цвета и покраснений, которые, совместно с оценками параллаксных из каталога HIPPARCOS, дадут возможность определить их светимости, радиусы и расстояния до них.



**Рис. 1.** Положение NVS из списка Ферни–Хьюб–Шмидта на диаграмме эффективная температура–светимость. Жирные кружки — по светимостям и показателям цвета, согласно Ферни, Хьюб (1971) и Шмидту (1972) (эффективные температуры рассчитаны по зависимости Крафта (1961)), пустые кружки — по эффективным температурам Ковтюха и др. (2008), жирные звездочки — сверхгиганты из работ Усенко (2015) и Усенко и др. (2015), пустые звездочки — объекты из данной работы. Штриховые линии — каноническая ПНЦ Сэндэйджа и Тамманна (1969), прямые линии — ПНЦ, согласно Боно и др. (2000).

2. Установление положений исследуемых NVS на диаграмме  $T_{\text{eff}} - \lg(L/L_{\odot})$  и сопоставление этих положений с границами ПНЦ и эволюционными треками звезд разных масс.
3. Определение и исследование химического состава данных звезд, особенно ключевых элементов эволюции желтых сверхгигантов.
4. Измерение лучевых скоростей данных звезд. Такая информация необходима, поскольку у многих NVS замечены их значительные различия на протяжении десятков лет.
5. Исследование спектральных линий поглощения, которые могут быть связаны с присутствием околозвездных оболочек.

## ОБЪЕКТЫ

В данной работе исследуется девять звезд. Как видно из табл. 1, все они занесены в каталог IRAS как яркие ИК-объекты. Из всех них лишь  $\epsilon$  Leo относится к классу ярких гигантов, а для трех ярких объектов ( $\alpha$  Aqr,  $\epsilon$  Leo и  $\mu$  Per) имеются многочисленные результаты определения параметров атмосфер и химического состава. В работе

Лака (2014) приведены самые последние подобные результаты для всех звезд списка, кроме  $\omega$  Gem.

У четырех самых ярких звезд списка наблюдается эмиссия в линиях H и K CaII, а также в h и k MgII (кроме  $\mu$  Per), что свидетельствует о хромосферной активности и потере массы, а именно:  $\alpha$  Aqr (Холланс, Биб, 1976; Стенсель, Муллан, 1980; Муллан, Стенсель, 1982),  $\epsilon$  Leo (Стенсель, Муллан, 1980; Вайлер, Эгерле, 1979),  $\mu$  Per (Дравинс, 1981),  $\omega$  Gem (Дравинс, 1981; Паскуини, Брокато, 1992). Кроме того, у  $\alpha$  Aqr наблюдаются корональные эмиссии линий He II 1640 Å (Хартманн и др., 1982) и He II 10830 Å (1979 год, ранее такого не было), при этом компонента поглощения сдвинута в синюю область на  $200 \text{ km s}^{-1}$ , что говорит о сильном звездном ветре (О’Брайен, Ламберт, 1986). А коротковолновые эмиссионные линии HeI, Cl, OI, MgI, SiI, Si, CaI — о наличии гибридной хромосферы с переходной областью солнечного типа (где образуется большая часть эмиссий) и холодной частью, где формируются линии поглощения в высокоскоростном (более  $100 \text{ km s}^{-1}$ ) звездном ветре (Раймерс, 1982). Отмечены сдвиги в синюю сторону линий NaI, H и K CaII, AIII на  $25 \text{ km s}^{-1}$  (Дюпри, 1986).

Таблица 1. Сведения об объектах и наблюдениях

Объект	Номер IRAS	Скопление (ассоц.)	Спектральный класс	$V$ , mag	Спектрограф	Экспозиция, мин	Спектральный диапазон, Å	HJD 2400000+	S/N
$\alpha$ Aqr	22032–0033	–	G2 Ib	2.94	РЫСЬ	10	5550–8800	49169.518	100
$\epsilon$ Leo	09430+2400	–	G0 II	2.98	РЫСЬ	10	5550–8800	49021.390	100
$\mu$ Per <sup>1</sup>	04112+4817	–	G0 Ib	4.16	РЫСЬ	10	5550–8800	49022.163	100
$\omega$ Gem	06593+2417	–	G5 Ib/II	5.19	CEGS	10	4720–6990	49231.417	100
BD +60 2532	23220+6118	NGC 7654	F8 Ib/II	8.29	ПФЭС	30	4980–8000	50274.494	100
HD 172365 <sup>2</sup>	18371+0512	IC 4756	F8 Ib/II	6.40	ПФЭС	20	5260–6955	50207.433	100
HD 187299 <sup>3</sup>	14962+2453	Vul OB2	G8 Ib	7.25	ПФЭС	20	4980–8000	50271.489	100
HD 190113 <sup>2</sup>	20002+3530	NGC 6871	G5 Ib	7.86	ПФЭС	30	4980–8000	50274.454	100
HD 200102 <sup>2</sup>	–	Cyg OB7	G1 Ib	6.65	ПФЭС	10	4980–8000	50274.467	100

<sup>1</sup> Спектрально-двойная:  $P_{orb} = 283^d3$  (Тримбл, Торн, 1969), спутник B9–A0,  $M_V = -2^m0$  (Парсонс, 1981); есть два визуальных компонента В и С.

<sup>2</sup> Возможная спектрально-двойная? (Бурки, Майор, 1983).

<sup>3</sup> Спектрально-двойная:  $P_{orb} = 1901^d$  (Гриффин, Рэдфорд, 1977), спутник B6/9V (Гриффин, Гриффин, 1979).

Рентгеновское излучение зафиксировано у  $\epsilon$  Leo (Зирин, 1975) и HD 200102 (Магьо и др., 1990). Ярко выраженные асимметричные ножевидные профили линии  $H\alpha$  отмечены у  $\alpha$  Aqr и  $\mu$  Per (Итон, 1995). Магнитное поле в  $0.47 \pm 0.36$  Гс обнаружено лишь у  $\alpha$  Aqr (Грунхут и др., 2010). Подозрения в переменности у  $\epsilon$  Leo (Ферни, Хьюб, 1971; Перси, 1975) и  $\omega$  Gem (Хенриксон, 1977). У HD 187299 (незатменная система типа  $\zeta$  Aur) присутствие оболочки вероятно (Стенсель и др., 1989), у HD 172365 (HR 7008) она не обнаружена (Соувелл, 1987). Последний объект относится к группе “литиевых” сверхгигантов (сильная линия  $LiI$  6808 Å, Лак, 2014), обладает высокой скоростью вращения и  $(Li/H)_{hel} = +3.07 \pm 0.12$  dex (Любимков и др., 2012).

#### НАБЛЮДЕНИЯ И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА

Наблюдения проводились в период 1992–1994 гг. с использованием эшелле-спектрографов РЫСЬ с разрешающей силой  $R \approx 25\,000$  (Клочкова и др., 1999) и ПФЭС (Панчук и др., 1998) с разрешающей силой  $R \approx 15\,000$  6-м телескопа БТА, и 1-м телескопа Цейсс САО АН РФ с использованием кудэ-эшелле спектрографа CECS с разрешающей силой  $R \approx 30\,000$  (Мусаев, 1996).

Информация об объектах и некоторые детали наблюдений приведены в табл. 1, где в столбцах с первого по десятый даны наименование объекта, его номер в каталоге IRAS, номер рассеянного скопления или ассоциации (если объект является

его членом), спектральный класс, средний блеск в фильтре  $V$ , согласно Центру звездных данных в Страсбуре (CDS), название спектрального прибора, продолжительность экспозиции, спектральный диапазон, гелиоцентрическая юлианская дата середины экспозиции HJD, суммированное отношение сигнал/шум соответственно.

Полный процесс получения спектров и редукции ПЗС-изображений подробно описан нами в предыдущих работах (Бердников и др., 2010; Усенко и др., 2011, 2013). Как было сказано выше, для увеличения отношения сигнал/шум и удаления следов космических частиц производилось суммирование полученных подряд двух спектров одного объекта с последующей медианной фильтрацией.

Обработка спектров производилась с помощью пакета программ DECH 20 (Галазутдинов, 1992). При этом эквивалентные ширины линий поглощения для всех объектов измерялись либо аппроксимацией гауссиановским профилем, либо прямым интегрированием. С помощью этого же пакета определялись значения лучевых скоростей (кросс-корреляционный метод). Точность определения значений  $V_r$  составляет 1–4 км с<sup>-1</sup>.

#### ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ

Для вычисления химического состава звезды необходимо прежде всего определить ее эффективную температуру  $T_{eff}$ , ускорение силы тяжести  $lg\,g$  и величину микротурбулентной скорости  $V_t$ .

Значения эффективных температур  $T_{eff}$  определялись методом, основанным на использовании

**Таблица 2.** Параметры атмосфер, лучевые скорости и скорости вращения исследуемых сверхгигантов

Объект	$T_{\text{эфф}}, \text{K}$	$\lg g$	$V_t, \text{км с}^{-1}$	RV			$v \sin i, \text{км с}^{-1}$
				ML	NL	H $\alpha$	
$\alpha$ Aqr	$5262 \pm 21$	1.70	3.90	$+7.54 \pm 1.35$	494	+4.81	$8.0^1; 10.5^2$
$\epsilon$ Leo	$5406 \pm 25$	2.40	2.50	$+4.08 \pm 1.66$	473	+1.21	$4.2^3; 5.0^4$
$\mu$ Per	$5412 \pm 23$	1.90	3.90	$+28.34 \pm 1.96$	502	+29.98	$7.4^5$
$\omega$ Gem	$5090 \pm 12$	1.20	3.70	$-9.84 \pm 1.10$	596	-6.57	$8.0^6$
BD +60 2532	$6268 \pm 18$	2.05	5.20	$-31.04 \pm 3.36$	652	-34.32	?
HD 172365	$6200 \pm 20$	2.60	7.60	$-19.54 \pm 1.00$	195	-26.67	$67.3^7; 58.0^2$
HD 187299	$4566 \pm 32$	1.30	3.30	$-10.20 \pm 3.51$	425	-	?
HD 190113	$4831 \pm 20$	1.90	3.60	$+11.12 \pm 2.61$	624	+18.41	?
HD 200102	$5438 \pm 18$	1.80	3.80	$-23.38 \pm 2.97$	632	-19.03	$9.0^7$

<sup>1</sup> Берначча, Перинотто (1970).<sup>2</sup> Любимков и др. (2012).<sup>3</sup> Грей, Тонер (1986б).<sup>4</sup> Бердюгина (1994).<sup>5</sup> Грей, Тонер (1987).<sup>6</sup> Лебре, де Медейрос (1997).<sup>7</sup> де Медейрос и др. (2002).**Таблица 3.** Параллаксы, показатели цвета, покраснения, абсолютные звездные величины, радиусы и расстояния для исследуемых объектов

Объект	$\pi, ''$	$E_{B-V}, \text{mag}$	$A_V, \text{mag}$	$R$	$M_V, \text{mag}$ (другие авторы)	$M_V, \text{mag}$ (данная работа)	$d, \text{пс}$	$R, R_{\odot}$
$\alpha$ Aqr	0.006	0.022	0.080	3.613	$-3.41^2$	-3.23	165	48.0
$\epsilon$ Leo	0.013	0.006	0.021	3.512	$-1.50^2$	-1.45	76	20.1
$\mu$ Per	0.004	0.085	0.302	3.558	$-2.78^2$	-3.11	248	42.9
$\omega$ Gem	0.002	0.033	0.122	3.690	$-3.80^3$	-3.41	495	55.6
BD +60 2532	-0.000	0.597	2.095	3.510	$-3.91^2$	$-3.91^2$	1050	76.7
HD 172365	0.003	0.180	0.629	3.494	$-2.50^1$	-1.82	330	18.2
HD 187299	0.002	0.257	0.976	3.797	$-5.40^4$	-2.20	495	39.8
HD 190113	0.002	0.360	1.333	3.703	$-5.20^5$	-1.95	495	31.7
HD 200102	0.001	0.250	0.899	3.594	$-2.43^1$	-4.23	991	71.3

<sup>1</sup> Ковтюх и др. (2010).<sup>2</sup> Ковтюх и др. (2012).<sup>3</sup> Паскуини, Брокато (1992).<sup>4</sup> Стотерс (1972).<sup>5</sup> Стенсель и др. (1989).

отношений глубин избранных пар спектральных линий, наиболее чувствительных к температуре. При этом применялся ряд спектральных критериев (Ковтюх, 2007). Этот метод обеспечивает внутрен-

нюю точность определения  $T_{\text{эфф}}$  порядка 10–30 К (ошибка среднего).

Величина микротурбулентной скорости  $V_t$  определена из условия независимости содержания ионизированного железа FeII, определяемого по

Таблица 4. Содержания элементов для ( $\alpha$  Aqr)

Элемент	Данная работа			Лак (2014) <sup>1</sup>
	[EI/H]	$\sigma$	NL	[EI/H]
C I	-0.20	0.37	11	-0.35
N I	+0.34	0.24	4	-
O I	-0.14	0.34	8	+0.08
Na I	+0.20	0.23	2	+0.68
Mg I	-0.01	0.19	5	+0.25
Al I	+0.28	0.25	6	+0.38
Si I	+0.02	0.14	31	+0.23
Si II	+0.23	-	1	-
S I	+0.22	0.10	3	+0.23
K I	+0.06	-	1	-
Ca I	+0.00	0.28	5	+0.19
Sc I	-0.00	-	1	+0.27
Sc II	-0.35	-	1	-
Ti I	-0.08	0.15	22	+0.16
Ti II	-0.01	0.04	2	-
V I	-0.08	0.10	17	+0.13
V II	+0.05	0.22	2	-
Cr I	-0.06	0.20	14	+0.26
Mn I	-0.24	0.15	3	+0.11
Fe I	+0.01	0.10	112	+0.15
Fe II	+0.01	0.14	22	-
Co I	-0.15	0.13	11	+0.15
Ni I	-0.13	0.13	40	+0.11
Cu I	-0.24	0.44	2	-0.04
Zn I	+0.20	-	1	+0.14
Sr I	+0.04	-	1	+0.53
Y I	-0.10	0.13	2	-
Y II	+0.21	0.03	2	+0.27
Zr II	-0.12	-	1	+0.23
La II	+0.24	-	1	+0.47
Ce II	+0.06	0.27	2	+0.40
Nd II	+0.11	0.23	3	+0.28
Eu II	+0.03	0.20	3	+0.24
Gd II	-0.05	-	1	-

<sup>1</sup> Для Si, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Y приведены усредненные значения по нейтральным атомам и ионам.

Таблица 5. Содержания элементов для  $\epsilon$  Leo

Элемент	Данная работа			Лак (2014) <sup>1</sup>
	[EI/H]	$\sigma$	NL	[EI/H]
C I	-0.13	0.31	10	-0.42
N I	+0.74	0.22	4	-
O I	+0.28	0.18	4	-0.16
Na I	+0.22	0.10	2	+0.41
Mg I	-0.08	0.21	8	+0.15
Al I	+0.02	0.22	9	+0.14
Si I	+0.05	0.15	35	+0.11
Si II	+0.09	-	1	-
S I	-0.07	0.13	4	+0.13
K I	+0.18	-	1	-
Ca II	+0.02	0.15	10	+0.15
Sc I	+0.01	0.31	2	-
Sc II	-0.02	0.22	3	-0.03
Ti I	-0.05	0.12	26	+0.03
Ti II	-0.00	-	1	-
V I	-0.13	0.20	15	-0.02
V II	+0.09	-	1	-
Cr I	-0.11	0.19	15	+0.07
Cr II	+0.56	-	1	-
Mn I	-0.06	0.07	3	+0.08
Fe I	-0.02	0.13	147	+0.04
Fe II	-0.03	0.11	22	-
Co I	-0.13	0.08	10	+0.03
Ni I	-0.12	0.13	46	-0.03
Cu I	-0.24	-	1	-0.11
Y I	-0.32	-	1	-
Y II	+0.10	0.14	2	+0.15
Zr II	-0.07	0.05	2	+0.13
La II	+0.18	-	1	+0.10
Ce II	-0.31	-	1	+0.33
Nd II	-0.09	0.09	3	+0.16
Eu II	-0.03	-	1	+0.01
Gd II	+0.10	-	1	-

<sup>1</sup> Для Si, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Y приведены усредненные значения по нейтральным атомам и ионам.

Таблица 6. Содержания элементов для  $\mu$  Per

Элемент	Данная работа			Лак (2014) <sup>1</sup>
	[E/H]	$\sigma$	NL	[E/H]
C I	-0.23	0.21	10	-0.38
N I	+0.57	0.18	6	-
O I	+0.19	0.33	5	-0.05
Na I	+0.05	0.14	3	+0.56
Mg I	+0.02	0.15	9	+0.15
Al I	+0.29	0.21	8	+0.35
Si I	+0.04	0.12	36	+0.14
Si II	-0.06	-	1	-
S I	+0.11	0.19	4	+0.28
K I	+0.06	-	1	-
Ca I	-0.16	0.07	7	+0.18
Sc I	+0.06	0.15	2	-
Sc II	-0.07	0.14	4	+0.22
Ti I	+0.03	0.15	26	+0.11
Ti II	-0.04	0.00	1	-
V I	-0.07	0.11	13	+0.04
V II	-0.18	0.17	2	-
Cr I	-0.11	0.18	15	+0.20
Cr II	+0.22	0.00	1	-
Mn I	+0.02	0.25	4	+0.05
Fe I	+0.02	0.13	159	+0.09
Fe II	+0.02	0.17	28	-
Co I	-0.29	0.06	9	+0.09
Ni I	-0.15	0.15	47	+0.06
Cu I	-0.20	0.12	2	-0.15
Y I	+0.02	-	1	-
Y II	+0.18	-	1	+0.17
Zr II	-0.42	-	1	+0.14
La II	+0.09	-	1	+0.31
Ce II	-0.20	-	1	+0.24
Nd II	+0.09	0.21	3	+0.24
Eu II	-0.01	0.17	3	+0.05
Gd II	+0.28	-	1	-

<sup>1</sup> Для Si, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Y приведены усредненные значения по нейтральным атомам и ионам.

Таблица 7. Содержания элементов для  $\omega$  Gem

Элемент	[E/H]	$\sigma$	NL
C I	-0.30	0.15	10
O I	-0.13	0.18	3
Na I	+0.06	0.14	6
Mg I	-0.34	0.25	4
Al I	-0.07	0.30	2
Si I	-0.09	0.12	23
Si II	+0.35	-	1
S I	-0.03	0.37	7
K I	+0.41	-	1
Ca II	-0.27	0.30	14
Sc I	-0.19	0.15	4
Sc II	-0.18	0.15	9
Ti I	-0.25	0.15	69
Ti II	-0.06	0.22	16
V I	-0.30	0.11	21
V II	-0.02	0.28	3
Cr I	-0.04	0.21	49
Cr II	-0.06	0.19	16
Mn I	-0.38	0.19	21
Fe I	-0.02	0.18	178
Fe II	-0.02	0.16	32
Co I	-0.19	0.17	35
Ni I	-0.30	0.14	85
Cu I	-0.18	0.38	4
Zn I	-0.41	0.33	3
Y I	-0.32	-	1
Y II	-0.03	0.26	9
Zr II	+0.15	0.21	5
La II	+0.23	0.26	5
Ce II	+0.14	0.26	15
Pr II	-0.15	0.24	4
Nd II	+0.12	0.19	15
Sm II	-0.03	0.30	4
Eu II	+0.20	0.10	2
Gd II	+0.18	-	1

Таблица 8. Содержание элементов для BD +60 2532

Элемент	Данная работа			Лак (2014) <sup>1</sup>
	[E/H]	$\sigma$	NL	[E/H]
C I	-0.29	0.15	14	-0.29
N I	+0.38	0.10	2	+0.33
O I	-0.15	0.30	5	-0.03
Na I	+0.27	0.08	4	+0.36
Mg I	+0.08	0.40	5	+0.04
Al I	+0.18	0.12	5	+0.16
Si I	+0.09	0.12	27	+0.14
Si II	+0.11	—	1	—
S I	+0.02	0.24	7	-0.01
K I	+1.58	—	1	—
Ca I	+0.04	0.18	11	-0.02
Sc I	+0.65	0.12	4	—
Sc II	+0.11	0.13	4	+0.23
Ti I	+0.11	0.12	29	+0.09
Ti II	+0.04	0.15	6	—
V I	+0.16	0.10	9	+0.11
V II	+0.15	0.22	4	—
Cr I	+0.02	0.14	24	+0.09
Cr II	+0.06	0.116	10	—
Mn I	-0.00	0.21	10	-0.08
Fe I	+0.07	0.11	171	-0.06
Fe II	+0.07	0.09	43	—
Co I	+0.14	0.25	16	+0.24
Ni I	+0.00	0.18	74	-0.05
Cu I	+0.48	0.23	5	-0.31
Sr I	+1.18	0.00	2	+0.80
Y II	+0.11	0.20	7	+0.28
Zr II	-0.03	0.22	4	+0.38
La II	+0.14	0.34	2	+0.08
Ce II	+0.09	0.17	7	+0.13
Pr II	-0.07	0.28	4	—
Nd II	+0.08	0.20	12	-0.01
Eu II	+0.34	0.12	3	+0.07
Gd II	+0.72	—	1	—

<sup>1</sup> Для Si, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Y приведены усредненные значения по нейтральным атомам и ионам.

Таблица 9. Содержание элементов для HD 172365

Элемент	Данная работа			Лак (1994)
	[E/H]	$\sigma$	NL	[E/H]
Li I	+2.06	—	1	+1.32
C I	+0.00	0.16	8	-0.17
O I	-0.03	0.17	4	-0.30
Na I	+0.12	0.16	3	—
Mg I	-0.04	0.22	3	+0.17
Al I	+0.06	0.04	2	+0.20
Si I	+0.02	0.19	12	+0.16
Si II	-0.06	—	1	+0.16
S I	-0.01	0.15	6	—
Ca I	-0.22	0.17	6	-0.06
Sc I	+0.46	0.13	4	—
Sc II	+0.33	0.12	4	-0.15
Ti I	+0.11	0.19	10	-0.28
Ti II	-0.06	0.16	3	—
V I	-0.12	0.21	4	—
V II	+0.02	0.26	4	—
Cr I	-0.03	0.21	14	—
Cr II	-0.18	0.24	5	—
Mn I	-0.29	0.11	7	—
Fe I	-0.01	0.09	75	-0.10
Fe II	-0.01	0.16	19	-0.08
Co I	+0.09	0.21	7	—
Ni I	+0.03	0.18	26	+0.04
Cu I	+0.31	0.04	2	—
Sr I	+0.29	—	1	—
Y I	-0.15	0.50	2	+0.30
Y II	-0.00	0.29	5	—
Zr II	+0.08	0.42	3	—
La II	+0.12	—	1	—
Ce II	+0.07	0.27	5	—
Pr II	+0.18	—	1	—
Nd II	+0.05	0.21	7	—
Eu II	-0.02	—	1	—

Таблица 10. Содержание элементов для HD 187299

Элемент	Данная работа			Лак (2014) <sup>1</sup>
	[E/H]	$\sigma$	NL	[E/H]
C I	+0.22	0.31	5	-0.13
N I	+0.65	—	1	—
O I	+0.03	0.33	6	+0.09
Na I	+0.33	0.11	2	+0.46
Mg I	-0.36	0.00	1	+0.30
Al I	+0.22	0.09	3	+0.58
Si I	+0.04	0.16	16	+0.37
S I	-0.01	0.15	3	+0.84
Ca I	-0.00	0.09	2	+0.13
Sc I	-0.16	0.20	4	—
Sc II	-0.06	0.17	3	-0.06
Ti I	+0.01	0.18	13	+0.03
Ti II	-0.04	0.11	2	—
V I	-0.23	0.14	13	+0.00
V II	-0.15	0.24	3	—
Cr I	-0.07	0.22	14	+0.22
Cr II	+0.19	0.19	8	—
Mn I	-0.24	0.38	7	+0.18
Fe I	+0.06	0.14	86	+0.08
Fe II	+0.06	0.13	21	—
Co I	-0.02	0.17	23	+0.10
Ni I	-0.11	0.23	38	+0.01
Cu I	-0.21	0.17	2	+0.07
Zn I	-0.30	—	1	—
Y II	+0.07	0.10	3	-0.05
Zr II	-0.05	0.15	4	-0.14
La II	+0.40	—	1	+0.30
Ce II	+0.01	0.34	4	+0.11
Pr II	-0.14	0.54	3	—
Nd II	+0.06	0.31	10	+0.16
Eu II	+0.33	0.61	2	+0.15
Gd II	+0.60	—	1	—

<sup>1</sup> Для Si, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Y приведены усредненные значения по нейтральным атомам и ионам.

Таблица 11. Содержание элементов для HD 190113

Элемент	Данная работа			Лак (2014) <sup>1</sup>
	[E/H]	$\sigma$	NL	[E/H]
C I	+0.56	0.15	11	-0.55
N I	+0.72	0.37	2	—
O I	-0.01	0.31	8	-0.06
Na I	+0.28	0.08	2	+0.59
Mg I	+0.07	0.26	4	+0.11
Al I	+0.45	0.29	4	+0.37
Si I	+0.07	0.14	25	+0.27
Si II	+0.02	0.11	2	—
S I	+0.49	0.34	7	+0.78
K I	+0.04	—	1	—
Ca I	-0.03	0.27	5	+0.06
Sc I	-0.10	0.23	5	—
Sc II	-0.05	0.21	6	+0.06
Ti I	+0.00	0.14	29	+0.05
Ti II	+0.14	0.20	3	—
V I	-0.11	0.09	14	+0.03
V II	-0.05	0.11	4	—
Cr I	+0.01	0.16	22	+0.16
Cr II	+0.33	0.23	10	—
Mn I	-0.09	0.28	8	+0.02
Fe I	+0.06	0.15	161	+0.07
Fe II	+0.07	0.12	21	—
Co I	-0.01	0.19	27	+0.08
Ni I	-0.04	0.21	64	+0.02
Cu I	-0.01	0.03	2	+0.07
Zn I	+0.21	—	1	+1.17
Y I	-0.15	0.50	2	—
Y II	-0.10	0.31	7	+0.00
Zr II	+0.15	0.17	4	+0.05
La II	+0.36	0.10	2	+0.54
Ce II	+0.10	0.20	7	+0.07
Pr II	+0.07	0.43	3	—
Nd II	+0.18	0.28	15	+0.25
Eu II	+0.29	0.05	3	+0.26
Gd II	+0.48	—	1	—

<sup>1</sup> Для Si, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Y приведены усредненные значения по нейтральным атомам и ионам.

**Таблица 12.** Содержания элементов для HD 200102

Элемент	Данная работа			Лак (2014) <sup>1</sup>
	[E/H]	$\sigma$	NL	[E/H]
C I	-0.24	0.12	13	-0.29
N I	+0.30	0.20	2	-
O I	+0.01	0.30	6	+0.01
Na I	+0.31	0.13	3	+0.40
Mg I	-0.01	0.34	5	+0.16
Al I	+0.26	0.21	6	+0.15
Si I	-0.04	0.11	35	+0.10
Si II	+0.06	0.21	2	-
S I	-0.11	0.30	6	+0.31
K I	+1.12	-	1	-
Ca I	-0.17	0.14	10	+0.02
Sc I	+0.07	-	1	-
Sc II	-0.27	0.11	9	+0.07
Ti I	+0.00	0.16	34	+0.05
Ti II	-0.02	0.10	5	-
V I	-0.13	0.16	18	-0.12
V II	-0.15	0.18	4	-
Cr I	-0.03	0.26	23	+0.10
Cr II	+0.09	0.25	14	-
Mn I	-0.23	0.16	15	+0.01
Fe I	+0.00	0.16	237	-0.02
Fe II	-0.00	0.09	29	-
Co I	-0.08	0.20	27	-0.06
Ni I	-0.12	0.17	67	-0.08
Cu I	-0.07	0.31	4	-0.07
Zn I	+0.39	-	1	+0.11
Y I	+0.29	-	1	-
Y II	-0.07	0.22	7	+0.10
Zr II	-0.10	0.39	5	+0.08
La II	-0.09	0.40	2	+0.14
Ce II	-0.23	0.22	7	-0.01
Pr II	-0.34	0.31	3	-
Nd II	-0.08	0.24	13	-0.04
Eu II	-0.03	0.28	3	+0.00

<sup>1</sup> Для Si, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Y приведены усредненные значения по нейтральным атомам и ионам.

**Таблица 13.** Линия бисектора в табличной форме для  $\alpha$  Aqr

RI	R (%)	RV (км с <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)
0.180	25	15.18	6562.971	0.332
0.216	30	10.64	6562.872	0.233
0.252	35	11.64	6562.893	0.255
0.288	40	11.72	6562.895	0.257
0.324	45	11.44	6562.889	0.250
0.361	50	11.67	6562.894	0.256
0.397	55	11.68	6562.894	0.256
0.433	60	11.68	6562.894	0.255
0.469	65	11.55	6562.891	0.253
0.505	70	11.26	6562.885	0.247
0.541	75	11.02	6562.880	0.241
0.577	80	10.61	6562.871	0.232
0.613	85	10.47	6562.868	0.229
0.649	90	10.28	6562.864	0.225
0.685	95	7.97	6562.813	0.174
0.721	100	0.00	6562.639	0.000

набору линий, от их эквивалентных ширин (Ковтюх, Андриевский, 1999).

Ускорение силы тяжести  $\lg g$  определено из условия ионизационного равновесия для атомов Fe I и Fe II.

Определенные нами параметры атмосфер для суммированных спектров приведены в табл. 2. Там же приведены значения лучевых скоростей, определенные отдельно по линиям металлов и по линии H $\alpha$ . При оценках параметров атмосфер и химического состава нами использовались солнечные силы осцилляторов (Ковтюх, Андриевский, 1999) и модели атмосфер Куруца (1992). Более подробная информация о методах определения параметров атмосфер исследуемых звезд и ошибках их измерения содержится в работе Бердникова и др. (2010).

#### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ СВЕРХГИГАНТОВ

В табл. 3 приведены основные характеристики NVS, исследуемых в данной работе. В колонках с первой по девятую приведены наименование объекта, его тригонометрический параллакс, взятый из каталога ван Лееувена (2007), избытки цвета  $E(B - V)$  из работы Ковтюха и др. (2008), соответствующие значения покраснений  $A_V$  и  $R = A_V/E_{B-V}$ , оценки  $M_V$  из работ других авторов

и полученные в данной работе на основе  $A_V$  и  $R$  оценки  $M_V$ , расстояний и радиусов. Значения  $A_V$  и  $R$  определялись согласно зависимости отношения  $R$  от  $E_{B-V}$  по Страйжису (1977) для данного спектрального класса звезды. Лишь для BD +60 2532 значения  $d$  и  $M_V$  определялись по эквивалентной ширине триплета кислорода 7771 Å, согласно Ковтюху и др. (2012).

### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химический состав исследуемых звезд определен в ЛТР-приближении с использованием программы WIDTH9 и сетки моделей Куруца (1992). В табл. 4–12 приведены полученные значения содержаний элементов относительно Солнца [E/H], ошибки их определений  $\sigma$ , а также указано число использованных линий данного элемента NL. Рядом для сравнения указаны аналогичные оценки содержаний, взятые из работ Лака (2014) (кроме табл. 7).

#### *Ключевые элементы эволюции желтых сверхгигантов: CNO, Na, Mg, Al*

Если оценить результаты содержания данных элементов для исследуемых объектов, то их можно разделить на три категории:

1. Объекты, прошедшие фазу первого перемешивания. Характерные особенности: дефицит C, избыток N, слабый дефицит или солнечное содержание O, избыток Na, солнечное содержание либо дефицит Mg, солнечное содержание либо избыток Al. Это  $\alpha$  Aqr,  $\epsilon$  Leo,  $\mu$  Per,  $\omega$  Gem, BD +60 2532, HD 200102. Следует обратить внимание на  $\epsilon$  Leo, у которого наименьший дефицит углерода и наибольший избыток азота, а также на  $\mu$  Per и  $\omega$  Gem с наименьшими, близкими к солнечному, содержаниями натрия. Если сравнивать с данными Лака (2014), то наибольшие расхождения в оценках содержаний заметны для ярких объектов ( $\alpha$  Aqr,  $\epsilon$  Leo и  $\mu$  Per), тогда как для остальных (кроме  $\omega$  Gem) наблюдается хорошее согласие.
2. Объекты, прошедшие фазу второго перемешивания. Характерные особенности: избыток C, избыток N, слабый дефицит или солнечное содержание O, избыток Na, солнечное содержание либо дефицит Mg, избыток Al. Это HD 187299 и HD 190113, хотя, по данным Лака (2014), у этих звезд содержания углерода показывают дефицит, а по остальным элементам наблюдается хорошее согласие.

3. Объекты, которые собираются впервые пересекать ПНЦ. Характерные особенности: близкие к солнечным содержания CNO, Na, Mg, Al. Это — литиевый сверхгигант HD 172365, хотя у него наблюдается небольшой избыток натрия. В работе Лака (2014) показан небольшой дефицит углерода, большой дефицит кислорода и большие избытки магния и алюминия.

**$\alpha$ -элементы.** Содержания этих элементов у всех звезд примерно близки к солнечному (за исключением слабого дефицита этих элементов у  $\omega$  Gem). Лишь у  $\alpha$  Aqr и HD 190113 заметен избыток серы. Хорошее согласие с данными Лака (2014).

**Элементы Fe-группы.** Для этих элементов также наблюдаются содержания, близкие к солнечным, за исключением отдельных элементов у некоторых звезд (слабый дефицит). Хорошее согласие с данными Лака (2014).

**Элементы r- и s-процессов.** Есть вариации содержаний некоторых элементов (от небольшого дефицита до небольшого избытка) для отдельных звезд, но в целом большинство оценок близки к солнечным. Хорошее согласие с данными Лака (2014).

### ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Оценки лучевых скоростей NVS внутри ПНЦ имеют важное значение, поскольку многие из этих объектов либо являются спектрально-двойными системами, либо заподозрены в двойственности. Не следует забывать и о возможных малоамплитудных пульсациях у этих звезд. В табл. 2 приведены значения лучевых скоростей, определенных отдельно по линиям поглощений металлов и по водородной линии  $H\alpha$  (кроме HD 187299, у которой вследствие дефекта изображения линия  $H\alpha$  недоступна для измерения). Каждая оценка лучевой скорости определялась, как уже было отмечено выше, с помощью кросс-корреляционного метода по максимальному значению глубины линии в ядре. Как видно из табл. 2, у более горячих сверхгигантов разница между оценками не превышает 3–4 км с<sup>-1</sup>, тогда как у более холодных — более 7 км с<sup>-1</sup>. Исключения составляют  $\mu$  Per с наименьшей разницей (спектрально-двойная) и горячая литиевая звезда HD 172365 с наибольшей разницей.

## ВОЗМОЖНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ОКОЛОЗВЕЗДНЫХ ОБОЛОЧЕК

Усенко и Ключкова (2015), Усенко и др. (2015) показали, что асимметрии линии  $H\alpha$  (так называемые ножевидные профили) могут служить индикаторами наличия оболочек как у пульсирующих, так и у непременных желтых сверхгигантов. Поскольку эти объекты имеют не очень высокие эффективные температуры, то форма их фотосферных линий поглощения определяется в основном за счет давления и доплеровского уширения. Скорости вращения у большинства объектов невелики, поэтому они не оказывают существенного влияния на их асимметрию. Собственно асимметрия данных линий измерялась за счет разности или частного для красной и синей полуширины профиля поглощения на половине его глубины, либо оценкой измерений уширения центра линии с использованием линии бисектора для глубин от 0.5 до 0.9, либо методом параболической подгонки ядра линии для определения ее середины. Как отмечено в работе Сэббей и др. (1995), два последних метода являются наиболее действенными для измерения центра линий поглощения.

Метод бисектора линии для NVS был впервые применен Греем и Тонером (1986б). Он включает в себя установление средних точек сегментов горизонтальной линии, ограниченной размером профиля линии. Один сегмент конструируется на левой стороне профиля для каждой точки, а второй — на правой стороне и определяется с помощью интерполяции лагранжианом. Для звезд данного типа выбирают от 10 точек, по которым определяют бисектор линии. Как правило, для анализа используются сильные линии металлов (авторы использовали линии FeI 6252.57 Å, 6265.14 Å, FeII 6247.56 Å и др.). NVS  $\alpha$  Aqr и  $\mu$  Per также были использованы в работе. Было показано, что линии бисекторов очень сильно различаются по спектральному классу, с переходом от аномальной асимметрии до обычной в районе спектрального класса G1 b. Однако использование водородных линий поглощения для данного метода неэффективно вследствие присутствия большого числа бленд в крыльях линии (что значительно искажает форму бисектора), и может быть ограничено лишь его применением к ядру линии. Для линий со сложной асимметрией более эффективен метод параболической подгонки (Сэббей и др., 1995). Асимметрия линий поглощения у NVS объяснялась либо за счет грануляции (Грей, Тонер, 1986б), либо за счет присутствия дополнительного ядра поглощения, возникающего в материале, пространственно разделенном в звездной атмосфере, но неразрешимом из профиля основной линии (Сасселов и др., 1989). Влияние

же конвекции на асимметрию характерно для звезд главной последовательности и гигантов (Грей, Тонер, 1986а).

На рис. 2 и 3 представлены профили линии  $H\alpha$  исследуемых объектов. Как следует из рисунков, характернее всего подобная асимметрия с красной стороны наблюдается у большинства исследуемых звезд, кроме BD +60 2532 и HD 172365. В качестве примера рассмотрим анализ профиля ядра этой линии с помощью бисектора для звезды  $\alpha$  Aqr.

Операция проводится с помощью одноименной опции в программном пакете DECH 30 (Галазутдинов, 2007). В данном случае используется унифицированный тип бисектора с шагом в 5% по глубине, где полная глубина линии соответствует 100%. Сама линия бисектора показана на рис. 4, а численные данные приведены в табл. 13. Также на рис. 4 для сравнения показана аппроксимация ядра линии  $H\alpha$  методом параболической подгонки (по сути это зеркальное отображение самой линии с помощью пакета DECH 20). Как видно из рис. 4, бисектор очень похож на аналогичный из работы Грея и Тонера (1986б), полученный по линиям металлов. Данные табл. 13 подтверждают наличие асимметрии в ядре. То же самое демонстрирует параболическая подгонка. Если считать асимметрию в ядре  $H\alpha$  возможным свидетельством присутствия ядра другой компоненты, то разница между ними будет составлять около  $7.4 \text{ км с}^{-1}$ . Подобное явление наблюдается и у  $\mu$  Per,  $\omega$  Gem, HD 190112, HD 200102 с похожей разницей в  $5\text{--}7.5 \text{ км с}^{-1}$ .

Для сравнения на рис. 5 и 6 представлены профили резонансных линий NaI D 5889.966 Å и 5895.932 Å. Как видно из этих рисунков, подавляющее большинство профилей этих линий имеют двойственную структуру. Рассмотрим каждый сверхгигант отдельно:

**$\alpha$  Aqr.** Ножевидные профили линий NaI D с красной стороны, при этом атмосфере звезды соответствуют более слабые блендированные компоненты, и их разница с более сильными составляет  $3.9$  и  $1.8 \text{ км с}^{-1}$  для 5889.950 и 5895.920 Å соответственно;

**$\epsilon$  Leo.** Одна симметричная компонента 5889.950 Å (компонента 5895.920 Å не попала в наблюдаемый спектральный порядок) линии NaI D соответствует атмосфере звезды;

**$\mu$  Per.** В наблюдаемый спектральный порядок попала лишь одна линия 5889.950 Å, при этом, как и у  $\alpha$  Aqr, ножевидный профиль и блендированная компонента, соответствующие атмосфере сверхгиганта, слабее и расположены с красной стороны. Разница между ними составляет примерно  $7.4 \text{ км с}^{-1}$ .

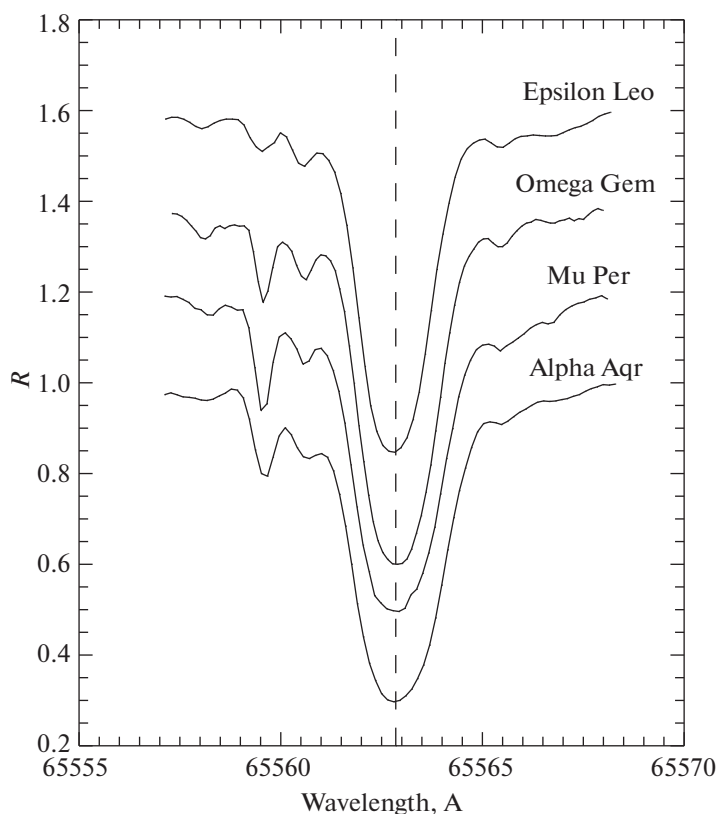


Рис. 2. Профили водородной линии  $H\alpha$  у сверхгигантов  $\alpha$  Aqr,  $\mu$  Per,  $\omega$  Gem,  $\epsilon$  Leo.

**$\omega$  Gem.** Имеется в наличии лишь профиль линии  $5895.920 \text{ \AA}$ , в котором ядро линии соответствует атмосфере звезды, а сама линия асимметрична с красной стороны;

**HD BD +60 2532.** Обе линии NaI D имеют ножевидную форму, асимметричную с синей стороны, при этом блендрованные компоненты с меньшей глубиной соответствуют атмосфере звезды. Разница между ними и основными компонентами составляет  $7.8 \text{ км с}^{-1}$  и  $8.4 \text{ км с}^{-1}$  для  $5889.950 \text{ \AA}$  и  $5895.920 \text{ \AA}$  соответственно.

**HD 172365.** Очень асимметричные профили линий NaI D. Уширенные части профилей смещены примерно на  $23.5 \text{ км с}^{-1}$  в синюю область.

**HD 187299.** Линии NaI D имеют ножевидную форму с асимметрией с синей стороны, где атмосфере звезды соответствуют более слабые блендрованные компоненты. Разница между ними и основными компонентами составляет примерно  $23.3 \text{ км с}^{-1}$ ;

**HD 190112.** Сильно асимметричные с красной стороны ножевидные профили линий NaI D, где более слабые блендрованные компоненты соответствуют атмосфере звезды, и разница между ними и основными компонентами в  $27 \text{ км с}^{-1}$  и  $25.3 \text{ км с}^{-1}$  для  $5889.950$  и  $5895.920 \text{ \AA}$  соответственно.

**HD 200102.** Ножевидные профили линий NaI D с асимметрией с синей стороны, где также более слабые блендрованные компоненты соответствуют атмосфере звезды. Разница между ними и основными компонентами составляет примерно  $7 \text{ км с}^{-1}$ .

Таким образом, у семи объектов наблюдается характерная ножевидная асимметрия, причем как с синей, так и с красной стороны. Вызвана она, как уже показано, многокомпонентностью линий дублета, т.е. помимо линий, образующихся в атмосфере звезды, присутствуют линии, соответствующие оболочке и (или) межзвездной среде. Поэтому дублет NaI D можно использовать также в качестве ее индикатора.

#### ПОЛОЖЕНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ЗВЕЗД НА ДИАГРАММЕ ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕМПЕРАТУРА–СВИТИМОСТЬ

На рис. 7 показаны положения исследуемых сверхгигантов на диаграмме  $\lg T_{\text{эф}} - \lg(L/L_{\odot})$  среди эволюционных треков звезд в  $3.4 M_{\odot}$ ,  $4.0 M_{\odot}$ ,  $4.2 M_{\odot}$ ,  $4.3 M_{\odot}$ ,  $4.7 M_{\odot}$ ,  $5.3 M_{\odot}$ ,  $6.0 M_{\odot}$  и  $7.3 M_{\odot}$ , интерполированных из моделей Шаллера и др. (1992). Голубая и красная границы ПНЦ для пульсаторов в основном тоне взяты из работы Боно

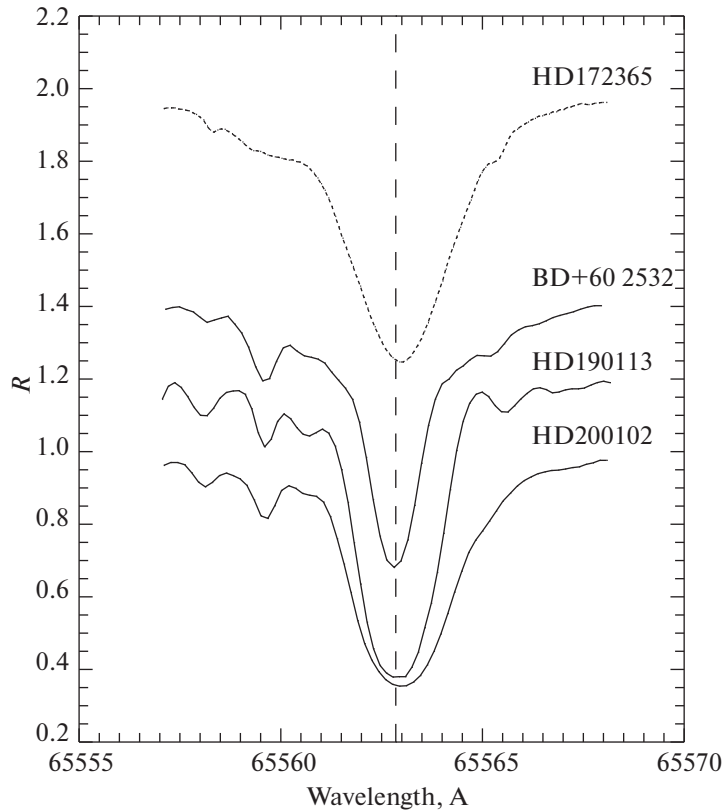


Рис. 3. Профили водородной линии  $H\alpha$  у сверхгигантов HD 172365, BD +60 2532, HD 190113, HD 200102.

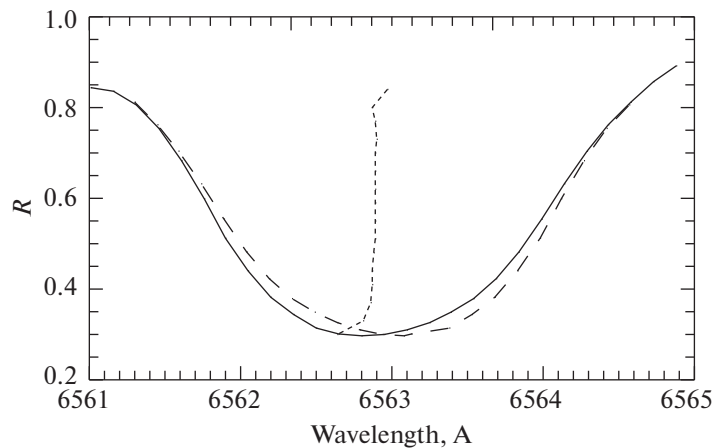


Рис. 4. Линия бисектора для ядра профиля водородной линии  $H\alpha$  для сверхгиганта  $\alpha$  Aqr (пунктир). Для сравнения крупным пунктиром проведена параболическая подгонка ядра линии. По оси абсцисс относительные интенсивности из табл. 12 представлены в оценках глубины линии.

и др. (2000). Как и на рис. 1, для сравнения обозначены положения сверхгигантов, исследованных в работах Усенко (2015) и Усенко и др. (2015). Как видно из рис. 7, положения исследуемых NVS очень разнообразны: два объекта расположены у голубой границы ПНЦ, три — у красной, один расположен далеко за голубой границей, а остальные три — за пределами красной границы ПНЦ.

Положение звезды HD 172365 у голубой границы ПНЦ близ эволюционного трека звезды в  $4.0 M_{\odot}$  (согласно Любимкову и др. (2012), масса  $4.2 M_{\odot}$ ) показывает, что сверхгигант собирается впервые пересекать ПНЦ, и его масса, вероятно, несколько меньше (примерно  $3.8 M_{\odot}$ ).

$\epsilon$  Leo расположен в нижней части петли эволюционного трека в  $3.4 M_{\odot}$ , что подтверждает

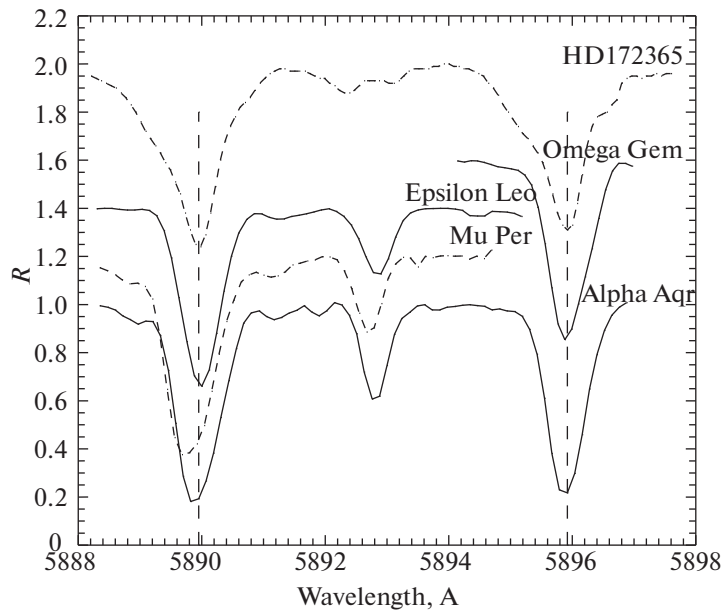


Рис. 5. Профили линий поглощения Na I D1 5889.95 Å и 5895.92 Å у сверхгигантов  $\alpha$  Aqr,  $\epsilon$  Leo,  $\mu$  Per,  $\omega$  Gem, HD 172365.

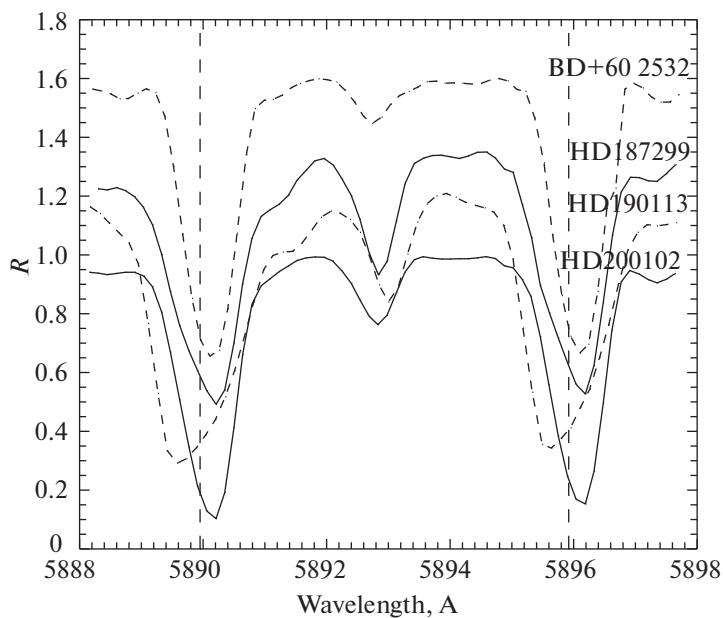


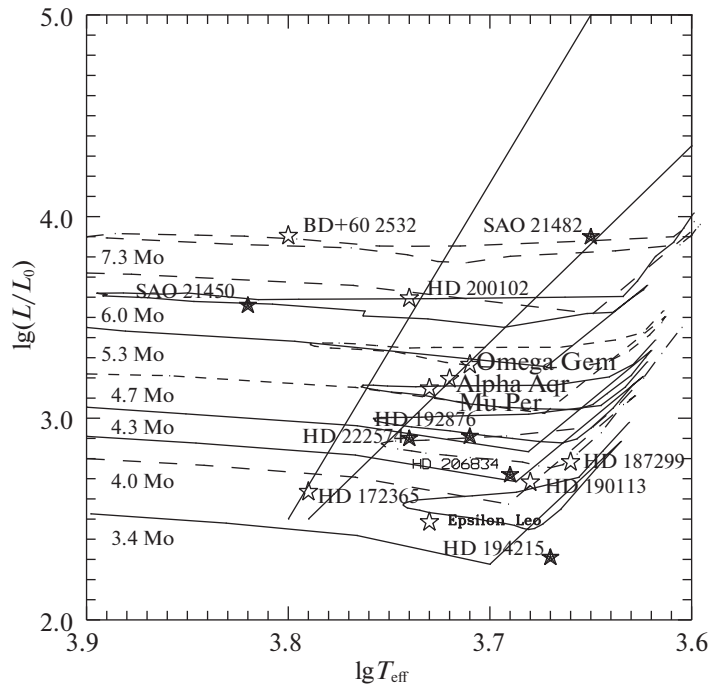
Рис. 6. Профили линий поглощения Na I D 5889.95 Å и 5895.92 Å у сверхгигантов BD +60 2532, HD 190113, HD 187299, HD 200102.

предположение о прохождении объектом стадии первого перемешивания, но в ПНЦ он не попадет по причине своей малой массы, в отличие от оценки в  $5 M_{\odot}$ , полученной Бердюгиной (1994). Поэтому  $\epsilon$  Leo стоит классифицировать как яркий гигант, а не сверхгигант.

HD 190113 и HD 187299 являются наиболее удаленными от красной границы ПНЦ. Возле HD 190113 расположен ранее уже исследованный

сверхгигант HD 206834 с эволюционной массой  $4.3 M_{\odot}$  (Усенко и др., 2015). Оба объекта расположены на треке в  $4.0 M_{\odot}$ .

$\mu$  Per расположена внутри ПНЦ ближе к красной границе ПНЦ, тогда как  $\alpha$  Aqr и  $\omega$  Gem — на самой границе. Их положения соответствуют трекам от  $4.7$  до  $5.3 M_{\odot}$ , для случая, когда данные объекты не впервые пересекают ПНЦ. Масса  $\alpha$  Aqr не превышает  $5 M_{\odot}$  ( $4.7 M_{\odot}$ , судя по треку),



**Рис. 7.** Положение исследуемых непериодических сверхгигантов на диаграмме эффективная температура–светимость. Эволюционные треки, согласно моделям Шаллера и др. (1992). Границы ПНЦ, согласно Боно и др. (2000). Обозначения объектов те же, что и на рис. 1.

что значительно ниже оценки в  $6.5 M_{\odot}$ , согласно Любимкову и др. (2012).  $\mu$  Per расположена рядом с  $\alpha$  Aqr, и ее значение массы может быть близким к  $4.7 M_{\odot}$ , что существенно ниже оценок около  $7 M_{\odot}$ , приведенных другими авторами. Положение  $\omega$  Gem на треке массой  $5.3 M_{\odot}$ , т.е. наша оценка массы звезды заметно меньше оценки в  $8 M_{\odot}$ , полученной Паскуини и Брокато (1992).

Интересно положение HD 200102: объект расположен на голубой границе ПНЦ на эволюционном треке звезды в  $6 M_{\odot}$  в месте, соответствующем третьему пересечению ПНЦ. Примерно то же самое можно сказать и о BD +60 2532 — объект расположен на эволюционном треке звезды в  $7.3 M_{\odot}$  для случая третьего пересечения ПНЦ.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из исследуемых нами девяти NVS лишь один объект — спектрально-двойная система  $\mu$  Per — расположен внутри ПНЦ (ближе к красной границе), тогда как из оставшихся восьми NVS два расположены на голубой границе, три — на красной, и оставшиеся три — за пределами ПНЦ (см. рис. 1 и 2). Как видно из рис. 1, подавляющее большинство NVS из списка Ферни–Хьюб–Шмидта находится вне канонических границ ПНЦ Сэндиджа и Тамманна (1969) и более современных от Боно и др. (2000) за красной границей. Этот факт объясняется более точными спектроскопическими оценками

эффективных температур, избытков цвета, расстояний и светимостей.

Как видно из данных табл. 3, наблюдается хорошее согласие с оценками абсолютных звездных величин исследуемых NVS с результатами, полученными в работе Ковтюха и др. (2010), за исключением  $\omega$  Gem, HD 187299 и HD 190113 (объекты не исследовались в упомянутой работе). Судя по оценкам радиусов этих NVS, наименьшим из них обладает литиевый сверхгигант HD 172365 ( $18.2 R_{\odot}$ ). Следом идет  $\epsilon$  Leo с оценкой в  $20.1 R_{\odot}$ . У трех сверхгигантов, расположенных вблизи красной границы ПНЦ ( $\alpha$  Aqr,  $\mu$  Per и  $\omega$  Gem), радиусы примерно близки. То же самое можно сказать об объектах, расположенных далеко за красной (HD 187299 и HD 190113) и синей границей ПНЦ (BD +60 2532 и HD 200102).

У  $\alpha$  Aqr, уникального сверхгиганта с гибридной хромосферой, оценки разности между компонентами линий NaI D в  $3.9$  и  $1.8 \text{ км с}^{-1}$  (для  $5889.950$  и  $5895.920 \text{ \AA}$ ) существенно отличаются от таковых в  $25 \text{ км с}^{-1}$ , согласно Дюпри (1986). Это свидетельствует о бурных переменных процессах хромосферной активности и образовании звездного ветра, играющих одну из ключевых ролей в формировании и развитии околозвездной оболочки, присутствие которой уже обсуждено ранее. Еще одним подтверждением может служить асимметрия ядра линии H $\alpha$  (ножевидный профиль). То же самое

наблюдается для  $\mu$  Peg и для  $\omega$  Gem, при этом оба сверхгиганта также демонстрируют хромосферную активность и ИК-избытки. Учитывая эти факты, а также положения объектов на эволюционных треках, их малую скорость вращения и химический состав, то можно сказать, что эти NVS уже прошли стадию первого перемешивания и у них может присутствовать околозвездная оболочка (Усенко, 2015). Единственное отличие  $\omega$  Gem от предыдущих объектов — значительная асимметрия линии NaI D 5895.920 Å, но с красной стороны.

Звезда  $\epsilon$  Leo расположена ниже и правее упомянутых выше сверхгигантов. Судя по положению на эволюционном треке, а также относительно малому значению радиуса, ее можно отнести, скорее, к ярким гигантам. Примечательно, что заметной асимметрии ядер линий H $\alpha$  и 5895.920 Å не наблюдается, хотя у объекта присутствует заметная хромосферная активность. В отличие от близкого по массе объекта HD 194215 (Усенко и др., 2015), содержание CNO-элементов свидетельствует о прохождении через фазу первого перемешивания, хотя их оценки несколько отличаются от таковых у желтых сверхгигантов.

BD +60 2532 является очень интересным объектом. Судя по содержанию ключевых элементов эволюции желтых сверхгигантов, звезда уже прошла стадию первого перемешивания, но находится достаточно далеко от голубой границы ПНЦ. Ее положение соответствует третьему пересечению для звезды с эволюционной массой, как у SAO 21462 из рассеянного скопления NGC 129 (Усенко, 2015). Поскольку возраст рассеянного скопления NGC 7654 (M52) ( $\lg t \approx 7.4$ , Харрис, 1976) предполагает образование и расположение в нем цефеид, то можно сказать, что BD +60 2532 — это бывшая цефеида, с быстрой эволюцией, благодаря относительно большой массе. Удивителен факт отсутствия заметной асимметрии ядра линии H $\alpha$ , хотя обе линии NaI D асимметричны с красной стороны с примерно одинаковой разностью между сильными и слабыми компонентами. Соответствуют ли более сильные компоненты межзвездным линиям поглощения натрия в рассеянном скоплении или оболочке, сказать трудно.

Объект HD 200102 по содержанию ключевых элементов эволюции желтых сверхгигантов очень напоминает BD +60 2532, но расположен вблизи голубой границы ПНЦ. На эволюционном треке он занимает положение, соответствующее также третьему пересечению ПНЦ звезды (что подтверждается малой скоростью вращения), хотя масса — как у впервые пересекающего ПНЦ SAO 21450 (Усенко, 2015). Однако, в отличие от него, HD 200102 имеет характерный ножевидный профиль ядра линии H $\alpha$  с красной стороны, и обе линии

NaI D также асимметричны (но с синей стороны) с примерно одинаковой разностью между сильными и слабыми компонентами. Это дает возможность сделать предположение о наличии у сверхгиганта оболочки.

Два сверхгиганта HD 187299 и HD 190113 очень похожи по своему эволюционному статусу: оба расположены далеко за красной границей ПНЦ и имеют похожий химический состав, характеризующийся избытком углерода, примерно как у SAO 21462, который, согласно Усенко (2015), уже несколько раз пересек ПНЦ и выходит на асимптотическую ветвь. Хотя HD 190113 расположен рядом с ранее исследованным сверхгигантом HD 206834 (Усенко и др., 2015), по сути, эти звезды имеют разный эволюционный статус и, скорее всего, HD 190113 имеет меньшую массу — около  $4 M_{\odot}$ . В спектр HD 187299 не попала линия H $\alpha$ , но у звезды наблюдается асимметрия линий NaI D с синей стороны со значительной разностью между сильными и слабыми компонентами. А у HD 190113 эти же линии также показывают асимметрию, но с меньшей разностью и с красной стороны, а ядро линии H $\alpha$  имеет характерный асимметричный ножевидный профиль и также с красной стороны. У HD 187299 наличие оболочки, как упоминалось ранее, подтверждалось космическими наблюдениями, тогда как для HD 190113 в этом плане делались лишь предположения. Если HD 187299 — известный мультисистемный компонент, то HD 190113 заподозрен в двойственности. Судя по химическому составу обоих сверхгигантов, можно предположить, что они неоднократно пересекали ПНЦ и, возможно, выходят на асимптотическую ветвь.

Литиевый сверхгигант HD 172365 уникален в плане оцененных содержаний CNO-элементов и своим положением на голубой границе ПНЦ. Судя по положению на диаграмме, объект находится на стадии эволюции гравитационного сжатия гелиевого ядра после пребывания на главной последовательности (ГП) и собирается впервые пересечь ПНЦ. Подобно SAO 21450 (Усенко, 2015), он имеет высокую скорость вращения и симметричное ядро профиля линии H $\alpha$ . Сложные асимметричные профили линий NaI D можно объяснить наложением линий натрия, образующихся в атмосфере сверхгиганта (уширенные) на линии межзвездной компоненты рассеянного скопления IC 4756. Отсутствие ИК-избытков и следов оболочки, а также относительно малый радиус данного сверхгиганта могут служить подтверждением вывода из работы Усенко (2015), что значительная часть оболочки образуется после стадии первого перемешивания, когда сверхгигант теряет часть своей массы.

Различия в содержаниях ключевых элементов эволюции желтых сверхгигантов между полученными в данной работе и результатами Лака (2014) для ярких звезд из списка ( $\alpha$  Aqr,  $\mu$  Per,  $\epsilon$  Leo) касаются в большей степени натрия и магния, и в меньшей, — углерода и кислорода. Объяснить это можно различиями в выборе сил осцилляторов и моделей атмосфер, в особенности определений  $T_{\text{eff}}$  и  $V_i$ . Наибольшие различия в содержаниях для сильных линий дает  $V_i$  — до нескольких десятых долей (как в случае, например, с натрием).

### ВЫВОДЫ

На 6-м телескопе БТА и 1-м телескопе Цейсс САО РАН были получены спектры девяти непременных сверхгигантов ( $\alpha$  Aqr  $\epsilon$  Leo,  $\mu$  Per,  $\omega$  Gem, BD +60 2532, HD 172365, HD 187299, HD 190113 и HD 200102). Результаты обработки и анализа полученных спектров показали, что:

1. При использовании более современных спектроскопических оценок  $T_{\text{eff}}$  и оценок светимостей на основе параллаксов каталога HIPPARCOS восемь из девяти исследуемых NVS на диаграмме  $T_{\text{eff}} - \lg(L/L_{\odot})$  находятся вне границ канонической ПНЦ Сэндэйджа и Тамманна (1969).
2. При использовании границ ПНЦ из Боно и др. (2000) видно, что из всех исследуемых объектов на данной диаграмме один находится внутри ПНЦ, но ближе к красной границе, два — на красной границе, три — за пределами красной границы, два — на голубой границе и один — за пределами голубой границы.
3. На основе полученных значений эффективных температур и известных значений параллаксов каталога HIPPARCOS определены значения покраснений, светимостей, расстояний и радиусов исследуемых сверхгигантов. Для шести объектов наблюдается хорошее согласие в оценках  $M_V$  с работой Ковтюха и др. (2010). При этом минимальные оценки радиусов у литиевого сверхгиганта HD 172365, а также у  $\epsilon$  Leo.
4. Судя по значительному (более чем в 5 раз) уменьшению оценок между основными и вторичными компонентами линий NaI D в синюю область у  $\alpha$  Aqr (на момент наблюдений) по сравнению с предыдущими, полученными на десятилетие ранее, в хромосфере сверхгиганта имеют место процессы бурной переменной активности и образования звездного ветра. Данные процессы

являются основными в формировании и развитии околозвездной оболочки.

5. Асимметричные ножевидные профили линии Na, которые, возможно, могут служить индикаторами присутствия оболочек у желтых сверхгигантов, наблюдаются у пяти объектов —  $\alpha$  Aqr,  $\mu$  Per,  $\omega$  Gem, HD 200102 и HD 190113. Хотя в спектре HD 187299 данная линия отсутствует вследствие дефекта изображения, наличие у нее подобного профиля вполне вероятно, поскольку присутствие оболочки подтверждено космическими наблюдениями.
6. Единственный из исследуемых NVS, находящийся внутри ПНЦ, —  $\mu$  Per — является спектрально-двойной системой.
7. Значения [Fe/H] для всех исследуемых сверхгигантов близки к солнечным.
8. Согласно оценкам CNO-элементов, Na, Mg и Al, восемь из девяти NVS списка (кроме HD 172365) уже прошли фазу первого перемешивания.
9. Содержания  $\alpha$ -элементов (за исключением некоторых элементов), элементов группы железа, элементов  $r$ - и  $s$ -процессов для всех исследуемых сверхгигантов оказались близки к солнечным.
10. Оценки эволюционных масс исследуемых сверхгигантов, согласно их положению на диаграмме  $\lg T_{\text{eff}} - \lg(L/L_{\odot})$  таковы:  $\alpha$  Aqr и  $\mu$  Per — около  $4.7 M_{\odot}$ ,  $\omega$  Gem —  $5.3 M_{\odot}$ ,  $\epsilon$  Leo — около  $3.4 M_{\odot}$ , у BD +60 2532 —  $7.3 M_{\odot}$ , у HD 200102 — около  $6.0 M_{\odot}$ , у HD 187299 и HD 19011 — около  $4.0 M_{\odot}$ . HD 172365 имеет массу около  $4.0 M_{\odot}$ .
11.  $\epsilon$  Leo, скорее всего, относится к ярким желтым гигантам.
12. У единственной из списка NVS BD +60 2532, которая расположена далеко вне голубой границы ПНЦ, факт возможного присутствия оболочки находится под вопросом.
13. HD 172365 после пребывания на ГП находится на эволюционной стадии гравитационного сжатия гелиевого ядра и движется в направлении первого пересечения ПНЦ.
14. HD 187299 и HD 190113, вероятно, уже прошли стадию второго перемешивания и двигаются на асимптотическую ветвь.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Швейцарского Национального научного фонда SCOPES (проект IZ73Z0152485).

И.А. Усенко выражает признательность В.В. Ковтюху и Г.А. Галазутдинову за помощь в подготовке и обработке спектрального материала и Д. Тернеру за полезные дискуссии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ареллано Ферро (A. Arellano Ferro), *MNRAS* **209**, 481 (1984).
2. Бердников Л.Н., Князев А.Ю., Усенко И.А., Ковтюх В.В., Кравцов В.В., Письма в Астрон. журн. **36**, 517 (2010) [L.N. Berdnikov et al., *Astron. Lett.* **36**, 490 (2010)].
3. Бердюгина С.В., Письма в Астрон. журн. **20**, 631 (1994).
4. Берначча, Перинотто (P.L. Bernacca and M. Perinotto), *Contr. Observ. Astron. Padova Asiago* **239**, 1 (1970).
5. Боно и др. (G. Bono, V. Castellani, and M. Marconi), *Astrophys. J.* **529**, 293 (2000).
6. Бурки, Майор (G. Burki and M. Mayor), *Astron. Astrophys.* **124**, 256 (1983).
7. Вайлер, Эгерле (E.J. Weiler and W.R. Oegerle), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **39**, 537 (1979).
8. ван Лееувен (F. van Leeuwen), *Astron. Astrophys.* **474**, 653 (2007).
9. Вильсон, Баппу (O.C. Wilson and M.C. Vainu Bharu), *Astrophys. J.* **125**, 661 (1957).
10. Галазутдинов Г.А., Препринт САО РАН **92**, 1 (1992).
11. Галазутдинов (G.A. Galazutdinov), *DECH 30 Package*; <http://gazinur.com/DECH-software.html> (2007).
12. Грей, Тонер (D.F. Gray and C.G. Toner), *Astrophys. J.* **310**, 277 (1986a).
13. Грей, Тонер (D.F. Gray and C. G. Toner), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **98**, 499 (1986b).
14. Грей, Тонер (D.F. Gray and C.G. Toner), *Astrophys. J.* **322**, 360 (1987).
15. Гриффин, Рэдфорд (R.F. Griffin and J.E. Gunn), *Obserg.* **97**, 169 (1977).
16. Гриффин, Гриффин (R. Griffin and R. Griffin), *MNRAS* **187**, 91 (1979).
17. Грунхут и др. (J.H. Grunhut, G.A. Wade, D.A. Hanes, and E. Alecian), *MNRAS* **408**, 2290 (2010).
18. Де Медейрос и др. (J.R. de Medeiros, S. Udry, G. Burki, and M. Mayor), *Astron. Astrophys.* **395**, 97 (2002).
19. Дизи (H.P. Deasy), *MNRAS* **231**, 673 (1988).
20. Дравинс (D. Dravins), *Astron. Astrophys.* **367**, 97 (1981).
21. Дюпри (A.K. Dupree), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **24**, 377 (1986).
22. Зирин (H. Zirin), *Astrophys. J.* **194**, L63 (1975).
23. Итон (J.A. Eaton), *Astron. J.* **109**, 1797 (1995).
24. Ключкова В.Г., Ермаков С.В., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Юшкин М.В., Препринт САО РАН **137**, 1 (1999).
25. Ковтюх (V.V. Kovtyukh), *MNRAS* **378**, 617 (2007).
26. Ковтюх, Андриевский (V.V. Kovtyukh and S.M. Andrievsky), *Astron. Astrophys.* **351**, 597 (1999).
27. Ковтюх и др. (V.V. Kovtyukh, C. Soubiran, R.E. Luck, D.G. Turner, S.I. Belik, et al.), *MNRAS* **389**, 923 (2008).
28. Ковтюх и др. (V.V. Kovtyukh, F.A. Chekhonadskikh, R.E. Luck, C. Soubiran, M.P. Yasinskaya, and S.I. Belik), *MNRAS* **408**, 1568 (2010).
29. Ковтюх и др. (V.V. Kovtyukh, N.I. Gorlova, and S.I. Belik), *MNRAS* **423**, 3268 (2012).
30. Кокс и др. (A. N. Cox, D.S. King, and J.E. Tabor), *Astrophys. J.* **184**, 201 (1973).
31. Крафт (R.P. Kraft), *Astrophys. J.* **134**, 616 (1961).
32. Куруц (R.L. Kurucz), *Model Atmospheres for Populational Synthesis. The stellar populations of galaxies. Symp. IAU 149* (Ed. B. Barbuy, A. Renzini, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1992), p. 225.
33. Лак (R.E. Luck), *Astron. J.* **147**, 137 (2014).
34. Лебре, де Медейрос (A. Lebre and J.R. de Medeiros), *Astron. Astrophys.* **320**, 845 (1997).
35. Ллойд-Эванс (T. Lloyd-Evans), *MNRAS* **141**, 109 (1968).
36. Любимков и др. (L.S. Lubimkov, D.L. Lambert, B.M. Kaminsky, Y.V. Pavlenko, D.B. Poklad, and T.M. Rachkovskaya), *MNRAS* **427**, 11L (2012).
37. Магьо и др. (A. Maggio, G.S. Vaiana, B.H. Haisch, R.A. Stern, J. Bookbinder, F.R. Haunden, Jr., and R. Rosner), *Astrophys. J.* **348**, 253 (1990).
38. Муллан, Стенсель (D.J. Mullan and R.E. Stencel), *Astrophys. J.* **253**, 716 (1982).
39. Мусаев Ф.А., Письма в Астрон. журн. **22**, 796 (1996) [F.A. Musaev, *Astron. Lett.* **22**, 715 (1996)].
40. О'Брайен, Ламберт (G.T. O'Brien, and D.L. Lambert), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **62**, 899 (1986).
41. Панчук и др. (V.E. Panchuk, I.D. Nadenov, V.G. Klychkova, et al.), *Bull. Spec. Astron. Observ.* **44**, 127 (1998).
42. Парсонс (S.B. Parsons), *Astrophys. J.* **247**, 560 (1981).
43. Паскуини, Брокато (L. Pasquini and E. Brocato), *Astron. Astrophys.* **266**, 340 (1992).
44. Паттерсон, Нефф (R.S. Patterson and J.S. Neff), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **419**, 215 (1979).
45. Перси (J.R. Percy), *Inform. Bull. Var. Stars* **983**, 1 (1975).
46. Раймерс (D. Reimers), *Astron. Astrophys.* **107**, 292 (1982).
47. Сасселов и др. (D.D. Sasselov, J.B. Lester, and M.S. Fieldus), *Astrophys. J.* **337**, L29 (1989).
48. Соувелл (J.R. Sowell), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **64**, 241 (1987).
49. Стенсель, Муллан (R.E. Stencel and D.J. Mullan), *Astrophys. J.* **238**, 221 (1980).
50. Стенсель и др. (R.E. Stencel, J.E. Pesce, and W. Hagen Baker), *Astron. J.* **97**, 1120 (1989).

51. Стотерс (R. Stothers), *Publ. Astron. Soc. Pacific*. **84**, 373 (1972).
52. Страйжис В.Л., *Многоцветная фотометрия звезд* (Вильнюс: Москлас, 1977).
53. Сэббей и др. (C.N. Sabbey, D.D. Sasselov, M.S. Fieldus, J.B. Lester, K.A. Venn, and R.P. Butler), *Astrophys. J.* **446**, 250 (1995).
54. Сэндэйдж, Тамманн (A. Sandage and Tammann), *Astrophys. J.* **157**, 687 (1969).
55. Тримбл, Торн (V.I. Trimble and K.S. Thorne), *Astrophys. J.* **156**, 1013 (1969).
56. Уотсон (R.D. Watson), *Ph.D. Thesis* (Austral. Nation. Univer., 1971).
57. Усенко (И.А. Усенко), Письма в Астрон. журн. **41**, 545 (2015) [I. A. Usenko, *Astron. Lett.* **41**, 501 (2015)].
58. Усенко И.А., Ключкова В.Г., Письма в Астрон. журн. **41**, 385 (2015) [I.A. Usenko, V.G. Klochkova, *Astron. Lett.* **41**, 351 (2015)].
59. Усенко И.А., Князев А.Ю., Бердников Л.Н., Кравцов В.В., Письма в Астрон. журн. **37**, 545 (2011) [I.A. Usenko et al., *Astron. Lett.* **37**, 499 (2011)].
60. Усенко И.А., Князев А.Ю., Бердников Л.Н., Кравцов В.В., Фокин А.Б., Письма в Астрон. журн. **39**, 493 (2013) [I.A. Usenko et al., *Astron. Lett.* **39**, 432 (2011)].
61. Усенко И.А., Князев А.Ю., Бердников Л.Н., Кравцов В.В., Письма в Астрон. журн. **41**, 715 (2015) [I.A. Usenko et al., *Astron. Lett.* **41**, 660 (2015)].
62. Ферни, Хьюб (J.D. Fernie and J.O. Hube), *Astrophys. J.* **168**, 437 (1971).
63. Харрис (G.L.H. Harris), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **30**, 451 (1976).
64. Хартманн и др. (L. Hartmann, A.K. Dupree, and J.C. Raymond), *Astrophys. J.* **252**, 241 (1982).
65. Хенрикссон (G. Henriksson), *Astron. Astrophys.* **54**, 309 (1977).
66. Холланс, Биб (D. R. Hollans and H. A. Beebe), *Publ. Astron. Soc. Pacific*. **88**, 934 (1976).
67. Шаллер и др. (G. Schaller, D. Schaefer, G. Meynet, and A. Maeder), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **96**, 269 (1992).
68. Шмидт (E.G. Schmidt), *Astrophys. J.* **172**, 679 (1972).
69. Шмидт и др. (E.G. Schmidt, J.D. Rosendhal, and S.P. Jewsbury), *Astrophys. J.* **189**, 293 (1974).