

УДК 524.35-56

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ LBV-ЗВЕЗДЫ V 532 (ROMANO'S STAR)

© 2011 О.Н. Шолухова¹, С.Н. Фабрика¹, А.В. Жарова², А.Ф. Валеев¹, В.П. Горанский²

¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, 119992 Россия

Поступила в редакцию 2 декабря 2010 г.; принята в печать 18 декабря 2010 г.

Представлены результаты исследования спектральной и фотометрической переменности яркой голубой переменной V 532 в галактике M 33. Фотометрические изменения прослежены с 1960 по 2010 гг., спектральные с 1992 по 2009 гг. У звезды наблюдался абсолютный максимум визуального блеска (1992–1994 гг., высокое/холодное состояние) и абсолютный минимум (2007–2008 гг., низкое/горячее состояние) с разницей блеска $\Delta V \approx 2.3$ mag. Найдены оценки температуры в абсолютном максимуме $T \sim 22000$ К и в абсолютном минимуме, $T \sim 42000$ К. Переменность спектра V 532 полностью соответствует изменениям температуры ее фотосферы, при этом как разрешенные, так и запрещенные линии формируются в протяженной атмосфере звезды. Обнаружены широкие компоненты наиболее ярких линий, уширение этих компонент вызвано рассеянием излучения на электронах в близких к фотосфере частях ветра. Измерена скорость ветра V 532 как разница между эмиссионным и абсорбционным пиками в профилях типа P Cyg. Скорость ветра явно зависит от размера фотосферы звезды или от величины визуального блеска, с уменьшением блеска скорость расширения ветра возрастает. В состоянии абсолютного минимума блеска найден кинематический разрез атмосферы V 532. Скорость ветра возрастает, а его температура падает с расстоянием от звезды. В низком/горячем состоянии спектральный класс звезды соответствует WN8.5h, в высоком/холодном – WN11. Мы проследили эволюцию V 532 совместно с эволюцией AG Car и WR-компонентом в массивной двойной системе HD 5980 в галактике SMC. Во время минимумов визуального блеска все три звезды прекрасно вписываются в последовательность WNL-звезд Crowther and Smith. Однако, в моменты возрастания визуального блеска все три звезды формируют отдельную последовательность. Возможно, что это отражает новое свойство LBV-звезд, а именно, в высоком/холодном состоянии они не соответствуют *bona fide* WNL-звездам.

Ключевые слова: Звезды — переменные и пекулярные

1. ВВЕДЕНИЕ

Яркие голубые переменные (LBVs)—одна из наименее понятных стадий в эволюции массивных звезд. Трудности в понимании этих объектов определяются как малочисленностью известных LBV-звезд, их разнообразием, сильной спектральной и фотометрической переменностью [1, 2], так и неточным знанием их фундаментальных параметров. Очевидно, что массивная звезда может проявить себя как LBV после стадии O-звезды Главной Последовательности и перед стадией поздней WR-звезды азотной последовательности (WNL). Однако, более точное положение LBV-звезд в переходе $OV \rightarrow WNL$ пока неясно [3]. Весьма вероятно, что стадия LBV и соответствующие этой стадии неустойчивости ветров определяется содержанием водорода в атмосфере звезды. Однако, как определение содержания водорода, так и точное определение светимости и температуры звезды

задача нелегкая. Определение фундаментальных параметров массивных звезд в близких галактиках, например в богатой массивными звездами галактике M 33, может быть более уверенным чем в нашей Галактике, так как расстояния до галактик измерены с достаточной точностью.

У LBV-звезд наблюдаются сильные изменения блеска и спектра при примерно постоянной болометрической светимости. Характерные времена такой глобальной переменности составляют месяцы—годы. При увеличении визуального блеска LBV-звезды температура фотосферы понижается до 9000 – 10000 К, размер фотосферы звезды увеличивается, это высокое/холодное состояние. Здесь и далее под фотосферой мы понимаем “псевдофотосферу”, то есть то место в ветре звезды, где формируется наблюдаемое континуальное излучение. При понижении визуального блеска тем-

пература заметно возрастает до 35000 К или даже выше [1, 4, 5], размер звезды уменьшается, это низкое/горячее состояние. В горячем состоянии спектры LBV весьма похожи на спектры WNL-звезд, однако, истинные звезды типа WN7/8/9 отличаются от LBV в низком/горячем состоянии рядом спектральных особенностей [3, 6], и низким содержанием водорода. Так называемые переходные (in transition или “slash”) звезды типа Ofpe/WN9, выделенные в отдельный класс звезд Walborn [7], похожи на звезды LBV в низком/горячем состоянии. Ofpe/WN9-звезды характеризуются смешанным спектром с эмиссионными линиями Of и WNL звезд. На примере двух галактических звезд типа LBV AG Car и He 3–519, которые в низком/горячем состоянии соответствовали типу Ofpe/WN9, Smith, Crowther & Prinja [6] предложили продление WNL-классификации до WN10 и WN11.

Тем не менее, до сих пор остается открытым вопрос, отличаются ли истинные звезды LBV в низком/горячем состоянии от самых поздних звезд WN9/10/11. Другими словами, возможно ли, что все звезды самых поздних типов WNL являются звездами LBV, которые за время их наблюдений (всего несколько десятков лет) не проявили сильной переменности блеска. Такие звезды, которые можно подозревать в принадлежности к типу LBV, принято называть спящими (dormant) LBV. Заметим, что спящие LBV-звезды могут быть не только среди звезд типа WNL. Две классические звезды LBV, η Car и P Cyg, сейчас имеют спектр OB-гипергигантов, переменность их блеска мала. Однако, несколько сот лет назад у них наблюдались гигантские вспышки (giant eruptions) [1]. Если бы не эти гигантские поярчания η Car и P Cyg и не знаменитая туманность вокруг звезды η Car, сейчас мы не смогли бы заподозрить их в принадлежности к классу LBV.

Известно два LBV-объекта, у которых за последние годы наблюдались переходы типа LBV \leftrightarrow WNL. Это LBV-звезда AG Car в нашей Галактике (см., например, [8]) и LBV-звезда V 532 в галактике M 33, которой посвящена эта статья. Известен также один обратный переход, WN3 \rightarrow WN11(LBV) \rightarrow WN4/5, это WR-компонент в массивной двойной WR-системе HD 5980 в галактике SMC (например, [9]). Исследование таких звезд особенно важно. Очевидно, что параметры этих звезд можно определить наиболее надежно, т. к. при кардинальных изменениях их спектров, ни химический состав, ни величина межзвездного поглощения света (в каком-то приближении и болометрическая светимость) не меняются. По исследованиям LBV-звезд во время

таких переходов, вероятно, можно сделать вывод о связи истинных (*bona fide*) LBV и WNL-звезд.

В этой работе мы изучаем звезду V 532 в галактике M 33 по спектрам, полученным с 1992 по 2009 г. В этот период наблюдались ее самое высокое/холодное (1992 г.) и самое низкое/горячее (1997–1998 г.) состояния, зарегистрированные по наблюдениям с 1960 г. Разница визуального блеска между этими двумя крайними состояниями составила 2.3 звездных величин.

Звезда V 532 ([10]¹, другие названия – Romano’s Star, GR 290) была открыта G. Romano в 1978 г. [11]. Он предположил, что эта голубая звезда принадлежит к переменным типа Хаббла-Сендиджа, однако без спектральной информации нельзя было сделать более определенных выводов. Далее эта звезда изучалась фотометрически в работах [12–16]. Фотометрическое поведение этой звезды вполне типично для LBV, оно очень похоже на наблюдаемое изменение блеска у AG Car [17]. Даже полная амплитуда изменения визуального блеска у этих двух звезд одинакова, 2.3–2.5 звездной величины.

Первый спектр V 532, по-видимому, был получен T. Szeifert в 1992 г. и опубликован в 1996 г. [4]. В его статье эта звезда была классифицирована как LBV-кандидат. Второй спектр был получен в 1994 г. [18] при спектральном обзоре звезд-кандидатов в LBV в галактике M 33. Спектр имел не очень хорошее качество, однако, авторы предположили, что эта звезда имеет тип WN. До 2000 г. звезда V 532 оставалась кандидатом в LBV-звезды, в известном обзоре [1] она также описана как кандидат. Явная спектральная переменность V 532 была обнаружена по спектрам, полученным с 1992 по 1999 г. [19]. Фотометрическая переменность, сопровождаемая переменностью спектра, не оставляла сомнений, что V 532 является звездой LBV [19].

Позднее V 532 спектрально изучалась уже как LBV-звезда в работах [20–25], где были представлены новые свидетельства спектральной переменности. По спектрам 1998 – 2001 гг., когда звезда имела промежуточную яркость, Фабрика и др. [21] нашли, что ее спектр соответствует типу Ofpe/WN9. Используя количественные спектральные критерии, введенные в [26], они классифицировали звезду как WN10–11. В этой же статье [21] была обнаружена туманность низкой поверхностной яркости вокруг V 532. Параметры звезды были найдены в [24] по спектральному

¹обозначение в каталоге “M33 V0532”, GCVS II/205, <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?II/205>; <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?B/gcvs> (GCVS B/gcvs)

распределению энергии (SED), построенному по результатам оптических наблюдений [27], проведенных в период с осени 2000 по осень 2001, когда звезда была в состоянии промежуточного блеска (спектральный класс WN10-11 [21]). Температура фотосферы была оценена [24] как $T \sim 35000$ К, светимость $\lg(L/L_{\odot}) = 6.24$, величина межзвездного поглощения $A_V \sim 0.8$. После 2006 г. видимый блеск V 532 сильно уменьшился, соответственно температура фотосферы возросла. В этом минимуме блеска спектр звезды был классифицирован как WN8-9 [25].

В этой работе мы представляем наиболее длинный ряд спектральных и фотометрических наблюдений V 532, по которым прослеживаем изменения спектра звезды.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. Фотометрические наблюдения

Для фотометрических оценок блеска V 532 были использованы исходные данные Romapo [11]. Эти оценки блеска получены по 104 фотопластинкам 67-см телескопа системы Шмидта обсерватории Асияго в 1960–1977 гг. Мы также использовали фотоматериалы фототеки Астрономического института им. П.К. Штернберга (ГАИШ) МГУ, представленные 678 пластинками, полученными на 50-см телескопе системы Максудова (АЗТ-5) в 1973–2005 годах. Фотографические наблюдения проводились в системе близкой к В. Фотоматериалы ГАИШ и методика обработки этих данных описаны в статьях [15, 28]. Все фотографические оценки были приведены в систему В. Точность этих оценок примерно 0.1 mag, но она снижается и ошибка достигает 0.2 mag, когда звезда слабеет, возле предела пластинки ошибка может достигнуть 0.5 mag. Подробнее описание всех фотографических данных мы приводим в статье [16].

В 2001 году были начаты ПЗС-наблюдения V 532. Они проводились на 1-м телескопе Цейсс Специальной Астрофизической обсерватории РАН (САО РАН) и двух телескопах Крымской лаборатории ГАИШ МГУ—АЗТ-5 и 60-см телескопе Цейсс-2. Ошибки ПЗС-наблюдений составляют 0.01 – 0.05 mag, то есть не хуже 0.05 mag. Новые BVRc-стандарты были получены на 1-м телескопе Цейсс САО РАН. Они использовались также для обработки фотографических наблюдений [16]. Таким образом окончательно мы имеем 104 оценки Romapo [11], 645 оценок АЗТ-5 и многоцветную ПЗС BVRc фотометрию (65B, 79V, 46Rc) в 2001–2010 гг. Мы используем также несколько оценок Viotti et al. [22] и одну оценку Humphreys [29]. Они хорошо согласуются с нашими данными.

2.2. Спектральные наблюдения

Спектры V 532 были получены нами в основном на 6-м телескопе БТА с использованием приборов UAGS, MPFS [21] и SCORPIO [30]. Мы также используем спектр V 532, любезно предоставленный нам Т. Szeifert [4], полученный в октябре 1992 г. на 3.5-м телескопе Calar—Alto со спектрографом TWIN и спектр, полученный по нашей просьбе А. Князевым на 2.2-м телескопе Calar—Alto со спектрографом SAFOS в июне 1999 г. Также мы представляем спектр, полученный нами на телескопе SUBARU со спектрографом FOCAS. Он был получен в рамках наблюдений по программе SS 433 [31] для сравнения со спектром SS 433, спектр которого (ветер горячего сверхкритического диска) очень похож на спектр звезды типа WN 10-11 [32]. Журнал спектральных наблюдений приведен в Таблице, в которой приведены также спектральные диапазоны и разрешения для каждого наблюдения. Все спектры были обработаны по стандартным методикам, использующимся для соответствующих спектрографов в средах MIDAS и IDL.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Фотометрическая переменность

На Рис. 1 мы приводим все фотометрические измерения V 532 с 1960 по 2010 гг. в полосе В. Стрелки показывают моменты получения спектров. За 50 лет наблюдений у звезды наблюдалось четыре сильных увеличения блеска, одно из которых, в 1990–1992 гг. было самым большим. Соответственно, было несколько минимумов блеска, самый глубокий из которых пришелся на 2007–2008 гг. Максимальная разница блеска составила $\Delta B \approx 2.3$ звездной величины. Спектральные наблюдения покрывают оба этих крайних состояния V 532. Подобная переменность блеска с амплитудой 1 – 2 звездных величины на интервале времени годы характерна для звезд типа S Dog [2]. Кривая блеска V 532 очень похожа на кривую AG Car [8], у которой за 30 лет также наблюдалось несколько экстремумов блеска с полной амплитудой $\Delta V \approx 2.4^m$ [8, 17].

Разброс фотометрических оценок внутри одного сезона наблюдений составляет около 0.4 величины. Он определяется не только ошибками измерений, но и реальной переменностью блеска. В ранних фотографических наблюдениях ошибка одного измерения составляла 0.1 – 0.2 величины, но далее в фотоэлектрических и ПЗС-наблюдениях она в несколько раз меньше, тем не менее разброс оценок блеска за один сезон так же велик, около 0.2 – 0.3 величины. В работе [15] исследовалась

Таблица. Журнал спектральных наблюдений

| JD 2400000 + | Дата | Прибор/телескоп | Диапазон, Å | Разрешение, Å |
|--------------|------------|------------------|-------------|---------------|
| 48910 | 15.10.1992 | TWIN/Calar Alto | 4450-5000 | 2.2 |
| 48910 | 15.10.1992 | TWIN/ Calar Alto | 5800-6800 | 2.4 |
| 49366 | 13.01.1994 | MOFS/БТА | 5500-7600 | 8 |
| 51075 | 18.09.1998 | MPFS/БТА | 4450-5850 | 4.5 |
| 51222 | 12.02.1999 | UAGS/БТА | 3280-8000 | 8.3 |
| 51346 | 16.06.1999 | CAFOS 2.2 | 5170-7690 | 7.5 |
| 51347 | 17.06.1999 | CAFOS 2.2 | 3050-6050 | 7.5 |
| 51372 | 12.07.1999 | UAGS/БТА | 4330-5570 | 5.6 |
| 51372 | 12.07.1999 | UAGS/БТА | 5500-6740 | 5.6 |
| 51373 | 13.07.1999 | UAGS/БТА | 3410-8100 | 18 |
| 51408 | 17.08.1999 | UAGS/БТА | 4400-6860 | 7.5 |
| 51573 | 29.01.2000 | UAGS /БТА | 4350-6750 | 8.7 |
| 51821 | 03.10.2000 | UAGS/БТА | 4400-6820 | 8.3 |
| 51933 | 23.01.2001 | UAGS/БТА | 4310-6740 | 8.3 |
| 52150 | 28.08.2001 | UAGS/БТА | 4300-6730 | 9.4 |
| 52553 | 05.10.2002 | MPFS/БТА | 4000-7000 | 6 |
| 53322 | 13.11.2004 | MPFS/БТА | 4000-7000 | 6 |
| 53388 | 17.01.2005 | MPFS/БТА | 4000-7000 | 6 |
| 53408 | 06.02.2005 | SCORPIO/БТА | 3500-7200 | 10 |
| 53614 | 30.08.2005 | SCORPIO/БТА | 3500-7200 | 10 |
| 53683 | 08.11.2005 | SCORPIO/БТА | 3500-7200 | 10 |
| 53952 | 03.08.2006 | SCORPIO/БТА | 4000-5700 | 5 |
| 54323 | 10.08.2007 | SCORPIO/БТА | 4000-5700 | 5 |
| 54379 | 05.10.2007 | SCORPIO/БТА | 4000-5700 | 5 |
| 54382 | 08.10.2007 | FOCAS/SUBARU | 3750-5250 | 1.1 |
| 54475 | 08.01.2008 | SCORPIO/БТА | 5700-7500 | 5 |
| 54477 | 10.01.2008 | SCORPIO/БТА | 4000-5700 | 5 |
| 55097 | 18.09.2009 | SCORPIO/БТА | 3900-5700 | 5 |
| 55115 | 09.10.2009 | SCORPIO/БТА | 3100-7300 | 10 |

кривая блеска V 532 в полосе В. Был найден ряд квазипериодов с характерными временами десятки дней как в высоком состоянии, так и в низком. Некоторые из них оказались достаточно стабильны и присутствовали в обоих состояниях. Авторы [15] предположили, что периоды в интервале 20 – 30

дней и более короткие связаны с пульсациями звезды, а более длинные периоды связаны с пульсационными неустойчивостями ветра (wind pulsations driven by the wind instabilities). В гидродинамических расчетах нелинейных радиальных осцилляций горячих звезд LBV Фадеев [33] нашел, что периоди-

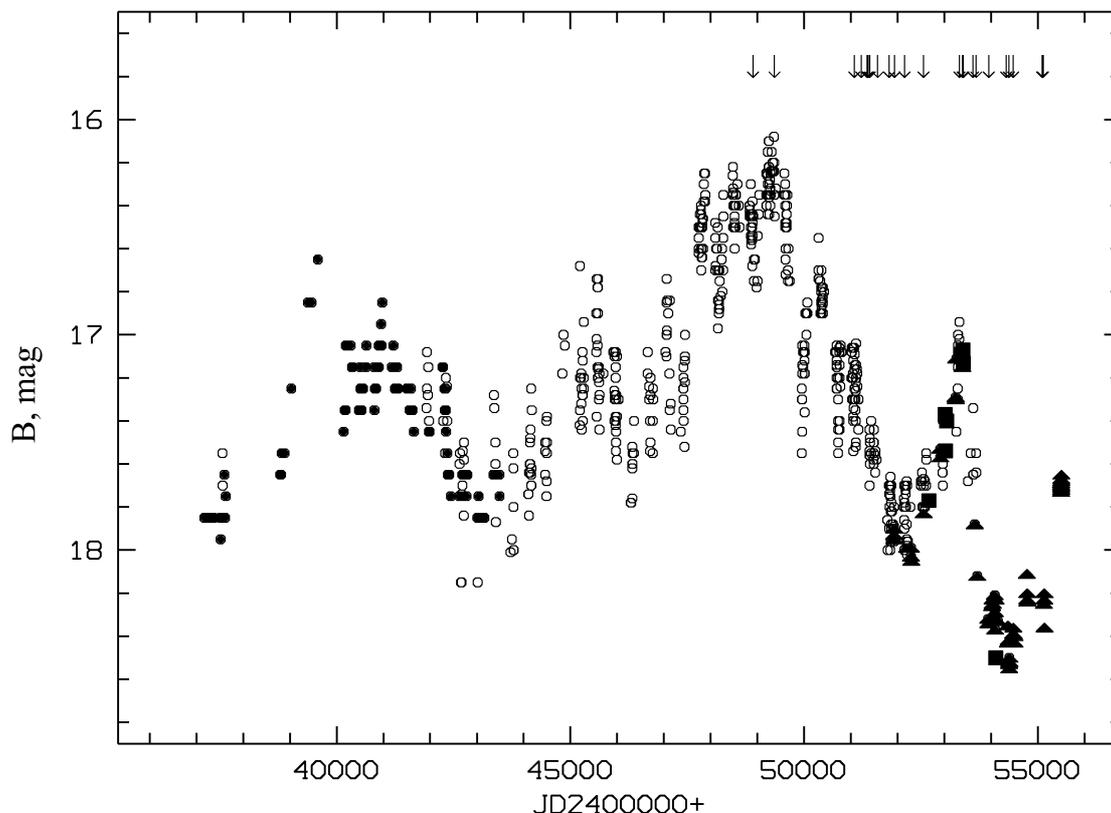


Рис. 1. Изменение блеска V 532 в полосе В по всем имеющимся данным с 1960 по 2010 гг. Открытые кружки—фотографические наблюдения [16], заполненные кружки—фотографические наблюдения Romapo [11], квадратики—данные [22], треугольники—ПЗС наблюдения [16]. Стрелками отмечены моменты спектральных наблюдений. За 50 лет наблюдений у звезды наблюдался абсолютный максимум 1992 – 1994 гг. (высокое/холодное состояние) и абсолютный минимум 2007 – 2008 гг. (низкое/горячее состояние).

ческие изменения блеска в интервале 6 – 31 дней в основном являются пульсационными.

На Рис.2а мы показываем фрагмент кривой блеска V 532 в фильтрах В, V, R совместно с фотографическими измерениями. Спектральные наблюдения неплохо покрывают локальный минимум визуального блеска 2000 – 2002 гг., локальный максимум 2004 – 2005 гг. и абсолютный минимум 2007 – 2008 гг. В конце 2009 г. (с ноября) блеск звезды начал несколько возрастать и к ноябрю 2010 г. увеличился на 0.7 звездной величины в полосе V. Следовательно, минимум 2007 – 2008 гг. был самым глубоким за все время наблюдений V 532. На этом же рисунке представлено изменение цвета В–V за время фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений. Видно, что изменения цвета типичны для LBV: при ослаблении блеска звезда становится голубее, однако, в изменениях заметны иррегулярности.

На Рис. 3 показана зависимость цвета В–V от изменения блеска в полосе В. В низком состоянии

при $B > 17.9$ зависимость цвет–величина весьма иррегулярна, амплитуда изменений доходит до $\Delta(B - V) \approx 0.15^m$. Блеск $B \approx 17.9$ выделен также по другой причине, при более слабом блеске зависимость цвет–величина становится более крутой. Если описать эту зависимость простой функцией без учета иррегулярностей, мы находим: $B - V = 0.037 + 0.033(B - 16.0)^2 - 0.027(B - 16.0)^3$. Эту зависимость мы будем использовать далее при анализе переменности потоков в линиях. Мы принимаем, что в самом глубоком минимуме блеск звезды соответствовал $B = 18.38 \text{ mag}$, $V = 18.55 \text{ mag}$ с неопределенностью около 0.05.

3.2. Спектральная переменность

Спектральные наблюдения охватывают период с 1992 по 2009 гг. На Рис.4–7 показаны все имеющиеся у нас спектры в голубом и красном диапазонах. Показаны отождествления основных линий. Однако в этой работе мы не будем останавливаться на детальном отождествлении спектра

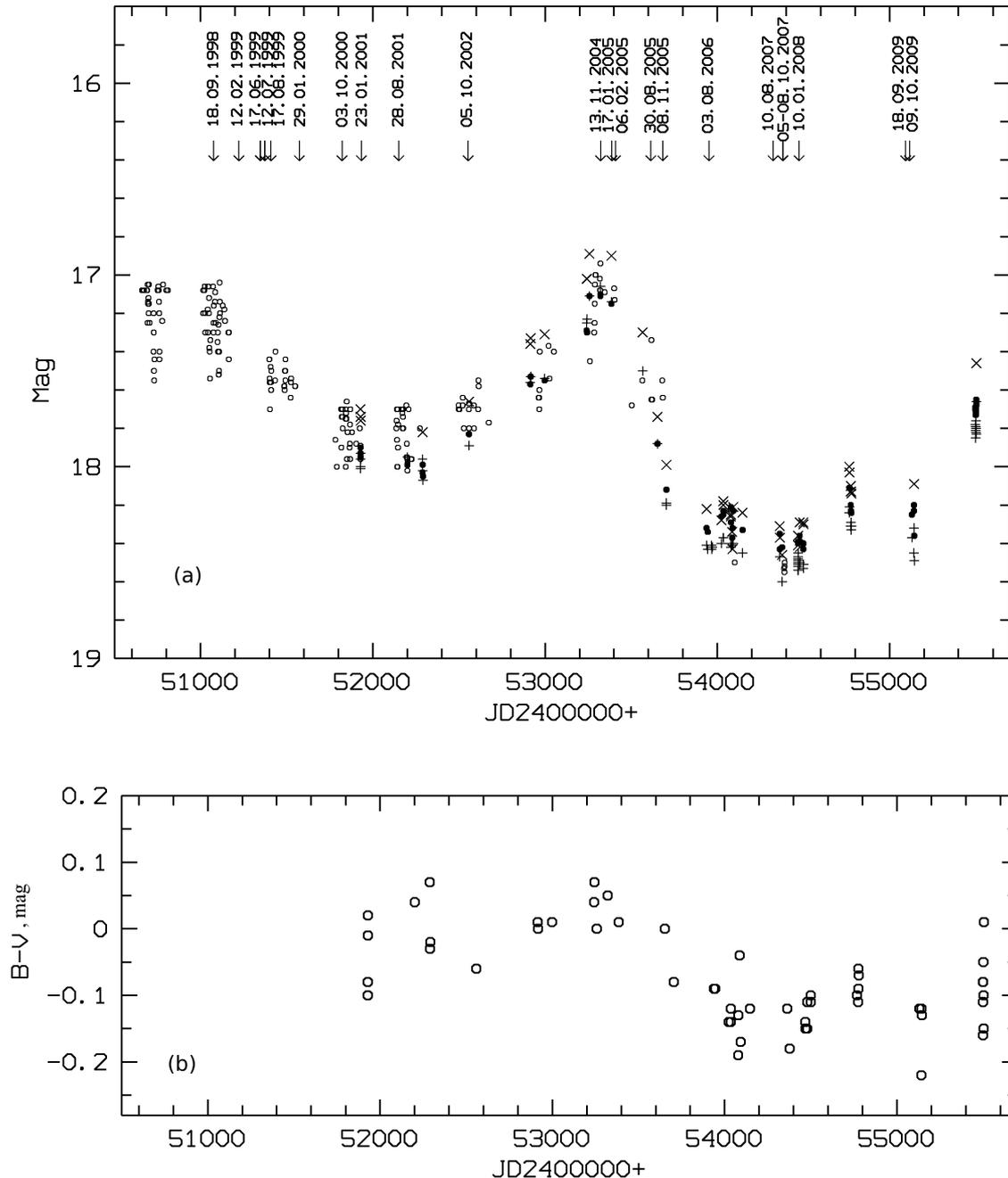


Рис. 2. (а): Фрагмент кривой блеска V 532, который наиболее плотно покрыт спектральными наблюдениями (отмечены стрелками). Заполненные кружки—наблюдения в полосе В, прямые крестики—V, косые крестики—R, открытые кружки—фотографические наблюдения. (б): Изменение цвета В–V со временем.

V 532 (описание его см. в [21] и [25]), мы опишем ниже эволюцию спектра и отдельных характерных спектральных линий.

Видны значительные изменения интенсивностей линий HeI, появление и исчезновение профилей типа P Cyg, эволюция линии HeII $\lambda 4686$ и бленды Боуэна (Bowen blend) CIII/NIИ $\lambda 4625 - 4650$, появление запрещенных линий [OIII] $\lambda \lambda 4959, 5007$,

[FeIII] $\lambda \lambda 4658, 4702, 5270$, [ArIII] $\lambda 7135$ (последняя не показана на рисунке) и других. Линия HeII $\lambda 5412 \text{ \AA}$ (не показана на рисунке) появляется одновременно с сильной линией HeII $\lambda 4686$, однако, у нее всегда присутствует профиль типа P Cyg. Последнее вполне объясняется сильной разницей оптических толщин в этих линиях, в ветрах WN-

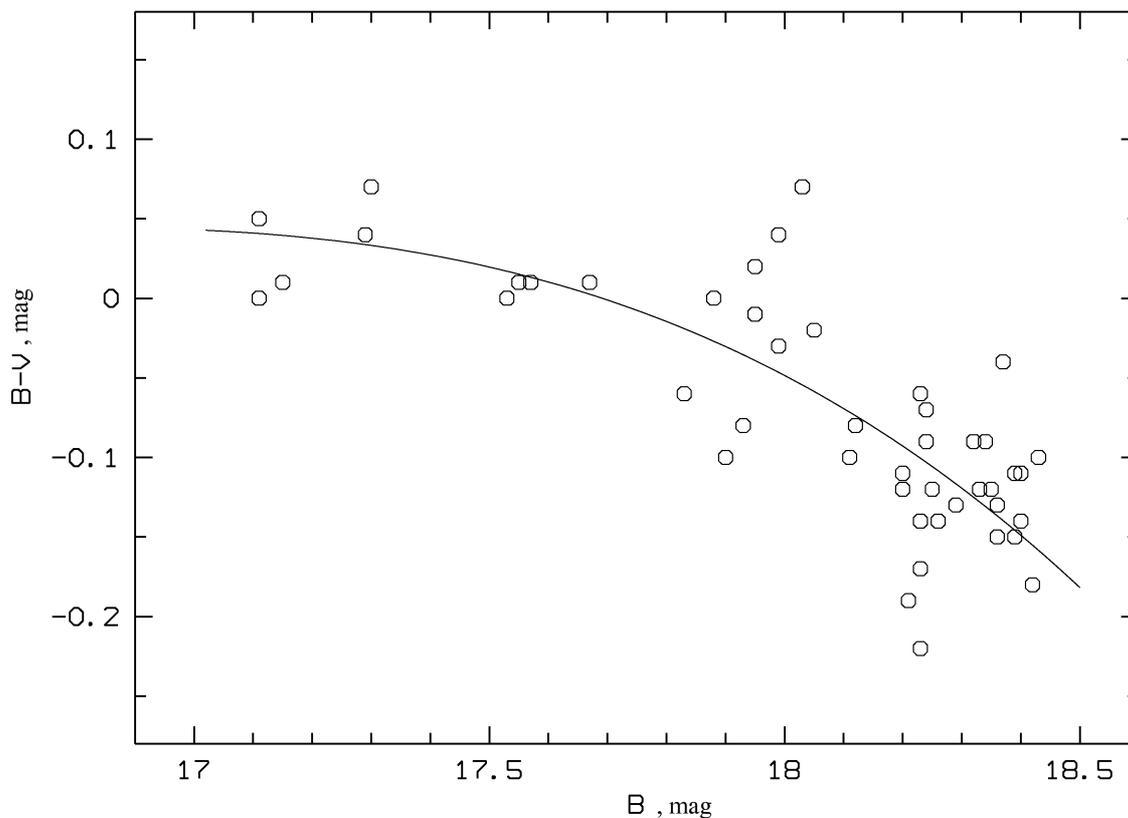


Рис. 3. Изменение цвета $B-V$ с блеском в полосе B . С понижением блеска при $B > 17.9$ зависимость становится более крутой, и возрастает амплитуда иррегулярных изменений. Показана аппроксимация полиномом (см. текст).

звезд линия 5412 \AA формируется близко к фотосфере (2–3 радиуса фотосферы), в то время как линия 4686 \AA может формироваться на нескольких десятках радиусов фотосферы [34].

При переходе звезды из высокого состояния в низкое спектральные изменения в V 532 весьма очевидны (Рис. 4–7), соответственно повышению температуры фотосферы появляются и усиливаются линии высокого возбуждения. Спектроскопия покрывает два высоких состояния 1990–1992 гг. (абсолютный максимум) и 2004–2005 гг. и два низких состояния 2000–2002 гг. и конец 2006 г. — начало 2008 г. (абсолютный минимум). Кроме очевидных изменений в спектре мы хотим обратить внимание на эволюцию широких компонент наиболее ярких линий водорода и гелия. В высоком состоянии (1992 и 2004–2005 гг.) появляется широкий компонент в линии $H\beta$, который пропадает в низком состоянии. В промежуточном высоком состоянии появляется широкий компонент в линии $\text{He I } \lambda 5876$ (например, спектр от 13.11.04), который не наблюдается как в более высоком состоянии, так и в низком. Такие же

широкие крылья в линии $\text{He I } \lambda 5876$ обнаруживаются в AG Car [17] и именно в таком же промежуточном или близком к высокому состоянию блеска. В низком состоянии широкие крылья этой линии пропадают [8]. В низком состоянии V 532 появляются широкие крылья линии $\text{He II } \lambda 4686$, но они не наблюдаются в линии $\text{He II } \lambda 5412$. Из этого следует, что широкие компоненты появляются в линиях с максимальной оптической толщиной и только в тех линиях, для которых температура фотосферы оптимальна для возбуждения данного перехода. Следовательно, широкие компоненты никак не связаны с вращением звезды или с доплеровским уширением линий в ветре, так как присутствуют яркие узкие компоненты в тех же профилях линий. Появление широких крыльев линий связано с уширением за счет рассеяния фотонов на свободных электронах (томсоновское рассеяние) в самых плотных и близких к фотосфере частях ветра.

Если появление широких крыльев линий связано с рассеянием света на электронах, как это обычно происходит с линиями водорода в горячих сверхгигантах, то ширина крыльев линий

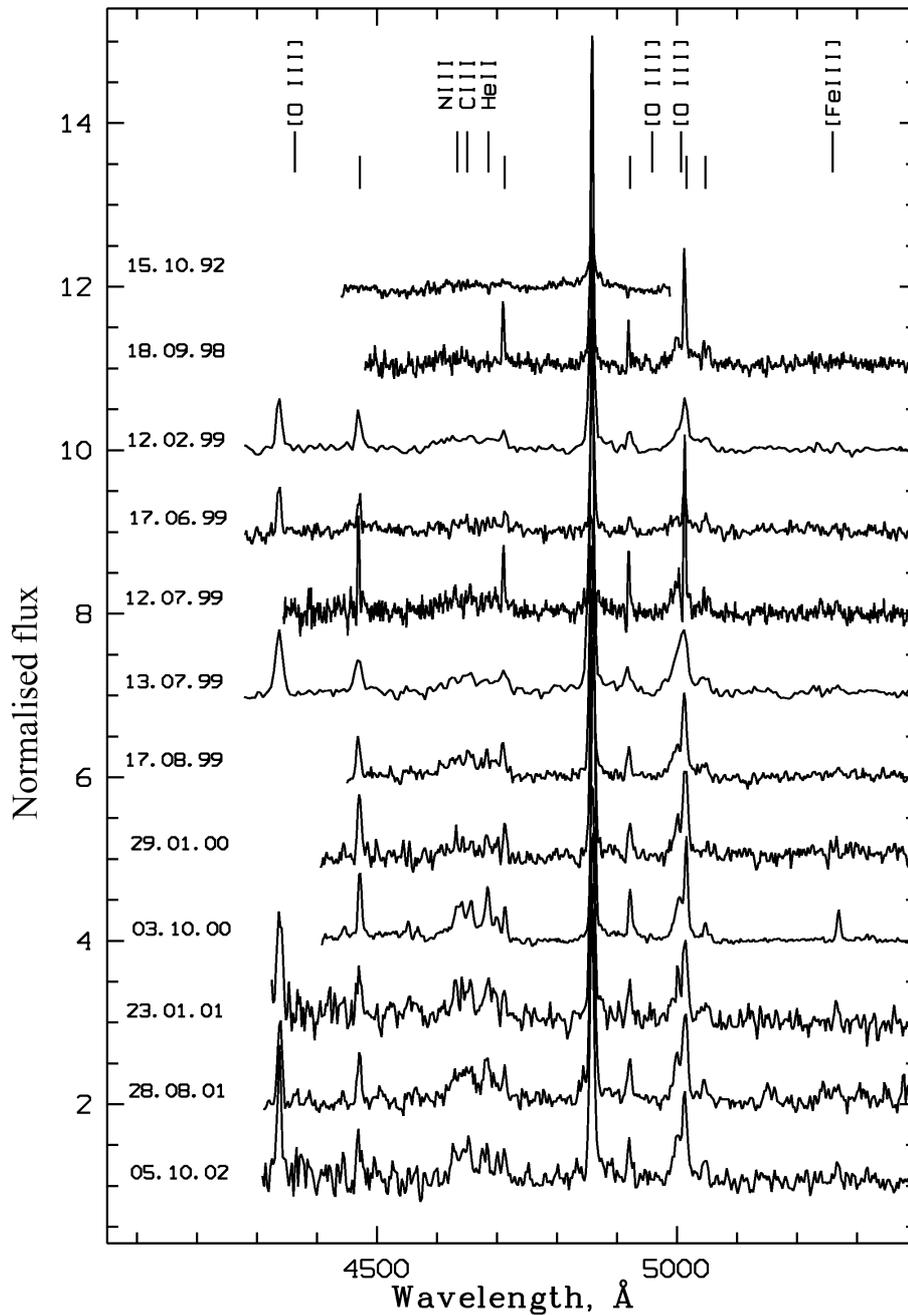


Рис. 4. Спектры V 532 в голубой области. Спектры нормированы на континуум и смещены по вертикальной оси каждый на 1.0, указано спектральное разрешение для каждого спектра (см. Табл.). Показаны отождествления основных линий, которые либо присутствуют всегда, либо появляются в отдельных состояниях звезды. Линии He I показаны вертикальными отрезками без надписи. Линии водорода не обозначены чтобы не загромождать рисунок.

определяется комбинацией оптической толщины в данной линии и электронной температуры. В V 532 мы измерили ширины широких компонент и нашли после исправления за спектральное разре-

шение: $FWHM(H\beta, H\alpha) = 1100 \pm 20$ км/с (спектр 15.10.92), $FWHM(He I \lambda 5876) = 1800 \pm 100$ км/с (спектр 13.11.04), у других линий He I тоже заметны широкие пьедесталы в профилях, однако

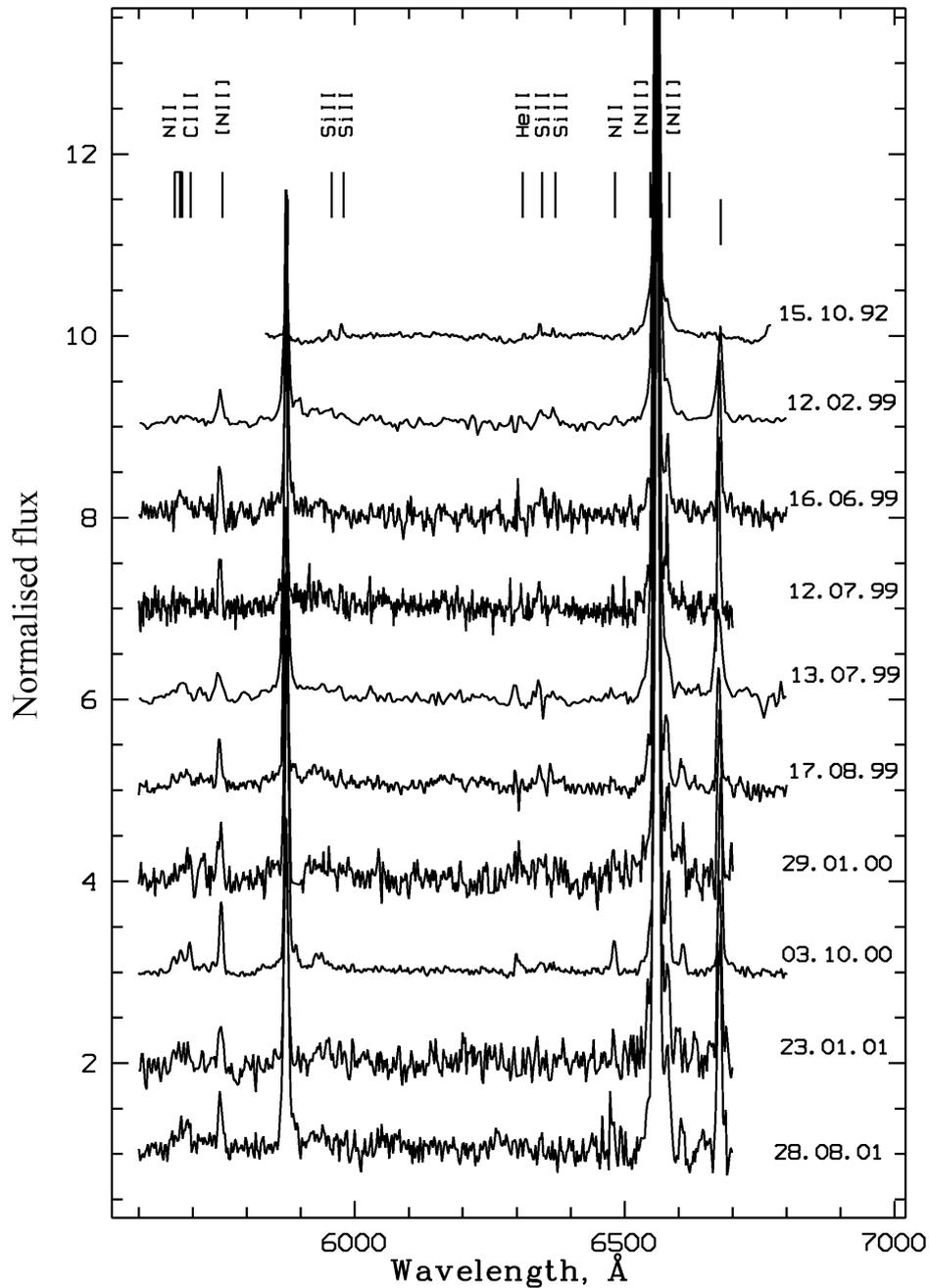


Рис. 5. Спектры V 532 в красной области. Остальное, как на Рис. 4.

их трудно измерить, $\text{FWHM}(\text{He II } \lambda 4686) = 1500 \pm \pm 70 \text{ км/с}$ (по спектрам 2007 – 2008 гг.).

Лучевая скорость V 532 измерена нами по спектру, полученному T. Szeifert 15.10.92. По четырем эмиссионным линиям Si II, профили которых вполне симметричны ($\lambda\lambda 5958, 5979, 6347, 6371$) лу-

чевая гелиоцентрическая скорость $-183 \pm 3 \text{ км/с}$. По линии поглощения Si III $\lambda 4553$ скорость -198 км/с (линии поглощения вполне могут иметь голубое смещение за счет ветровых эффектов), по запрещенной линии [NII] $\lambda 6583$ получена скорость -180 км/с . Эта линия, скорее всего, принадлежит

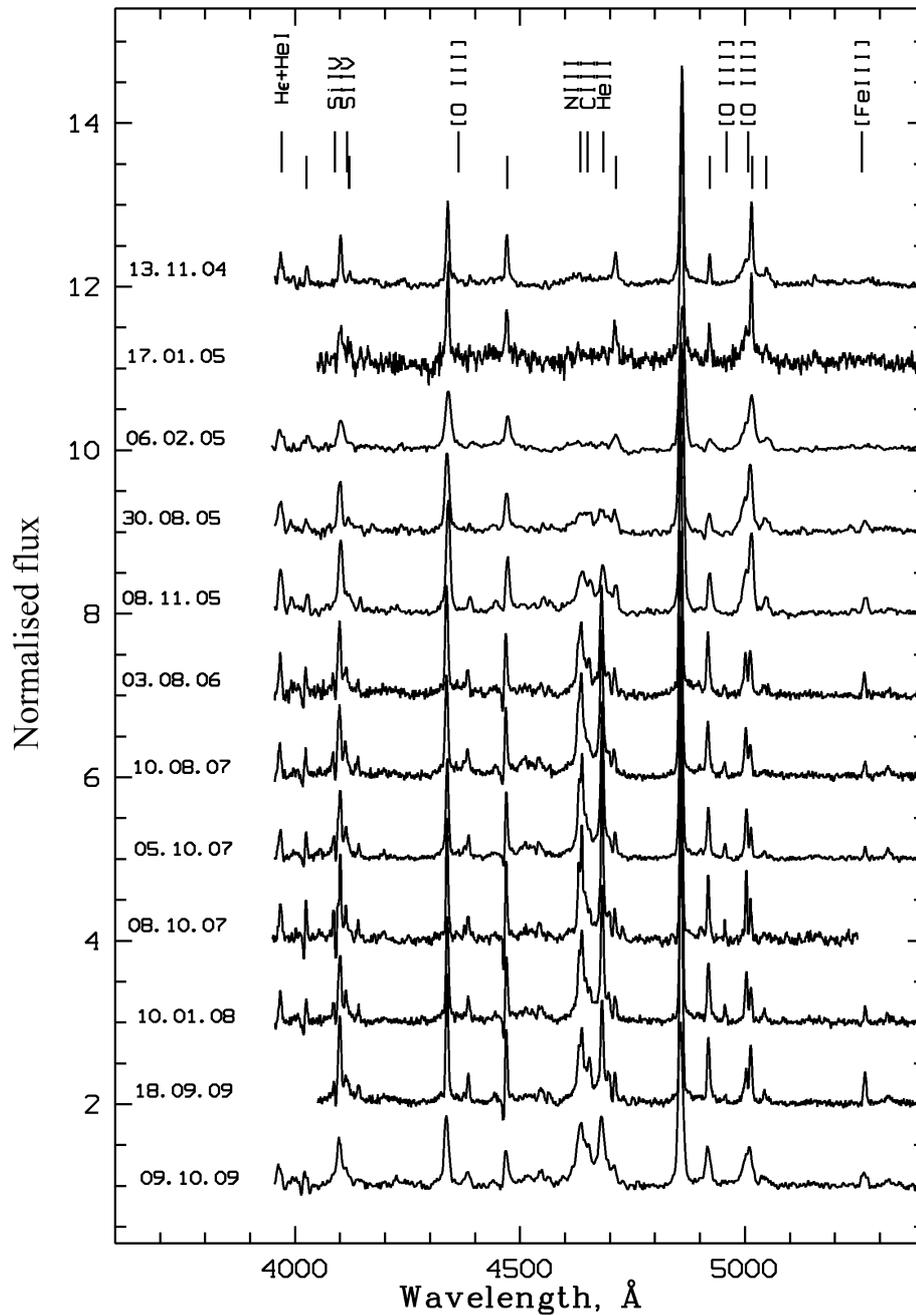


Рис. 6. Спектры V 532 в голубой области. Остальное, как на Рис. 4.

протяженной туманности [21], которая попадает в щель спектрографа и не полностью вычитается. Линии водорода искажены поглощением с голубой стороны, линии He I в основном в поглощении, они весьма слабы и вполне могут быть искажены эмиссией, поэтому по ним скорость не измерялась.

Мы также измерили лучевые скорости по спектру, полученному нами на телескопе Subaru 08.10.2007. В это время звезда была в низком/горячем состоянии. Этот спектр хорошего качества, но практически все основные линии (He I) искажены поглощением с голубой стороны.

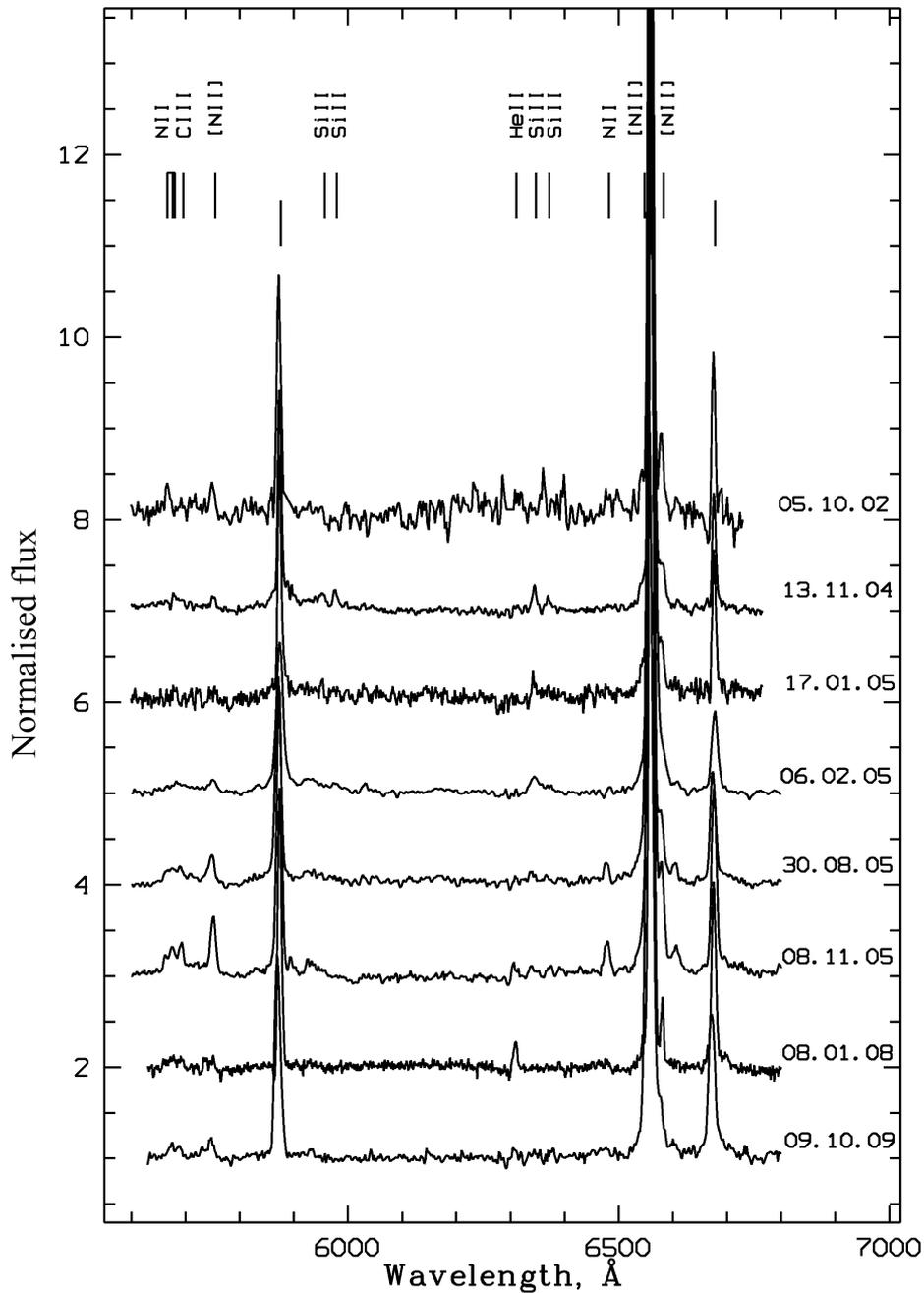


Рис. 7. Спектры V 532 в красной области. Остальное, как на Рис. 4.

Пик симметричной линии $H\beta$ показал скорость -186 км/с, две линии $[OIII]$ $\lambda\lambda 4959$ и 5007 — -220 км/с. Эти линии $[OIII]$ сильнопеременны, их изменение полностью повторяет эволюцию $[FeIII]$ $\lambda 5270$, $[ArIII]$ $\lambda 7135$, $[NII]$ $\lambda 5755$ и некоторых разрешенных линий (см. ниже). Мы полагаем, что

все эти запрещенные линии формируются во внешней протяженной атмосфере звезды, асимметрия которой может приводить к искажению лучевых скоростей. Ориентируясь на хорошее согласие лучевых скоростей по симметричным эмиссионным линиям $Si II$ и $H\beta$ в спектрах, полученных с раз-

ницей по времени 15 лет, с лучшим спектральным разрешением, мы принимаем за лучевую скорость звезды величину -184 ± 3 км/с.

3.3. Спектральная классификация

В промежуточном состоянии блеска в 1998 – 2001 гг. (Рис. 2), Fabrika et al. [21], используя количественные спектральные критерии, введенные Crowther and Smith [26], нашли, что спектральный тип звезды V 532 соответствует WN10-11. По спектрам 2008 г., когда звезда находилась в низком состоянии, в [20] по тем же критериям [26] нашли, что спектральный класс звезды близок к WN8-9, то есть в зависимости от величины визуального блеска спектральный класс V 532 меняется между WN11 и WN8-9.

Имея наиболее длинный ряд спектральных наблюдений мы можем анализировать переменность V 532 более детально. На Рис. 8a–8b мы воспроизводим основные диаграммы из [26], которые описывают классификационные (в основном температурные) последовательности поздних звезд WN. В статье [26] эта диаграмма была составлена для звезд Галактики и LMC, однако, как заключили авторы, на классификационных диаграммах принципиальной разницы между звездами этих двух галактик нет. Диаграммы Рис. 8a–8b показывают связь между эквивалентными ширинами линий He I $\lambda 5876$ и He II $\lambda 4686$ и связь между эквивалентной шириной и полушириной линии He II. Полуширины линии He II (FWHM) в V 532 были исправлены за инструментальное разрешение.

На диаграммы Рис. 8a–8b мы поместили звезды WR 25 и Sk $-67^\circ 22$ из статьи [26]. Кроме этого, мы нанесли звезды AG Car [8, 17] и HD 5980 [9, 35–37], которые, как считается, показывали LBV-переходы (см. Введение). Перемещения этих двух звезд на диаграммах Рис. 8a–8b отражают эти переходы. Для HD 5980 мы взяли только измерения, приходящиеся на орбитальные фазы хорошей видимости звезды-компонента A [9], который показал спектр WN 11 во время ее знаменитой вспышки в октябре 1994 г. Мы видим на Рис. 8a–8b, что во время этой вспышки HD 5980 действительно переместилась в область WN10–11 на обеих диаграммах. LBV-явление в HD 5980 хорошо заметно на рисунке. До этой вспышки (одна точка на Рис. 8a 1993 г. и две точки на Рис. 8b 1961 и 1993 гг.) звезда находится в области WN6–7. Следующая после вспышки точка декабря 1994 г. ничем не отличается от всего последующего WN6–7 состояния системы (1999 – 2005 гг.) на Рис. 8b, но оно отличается большой яркостью

линии He I и He II (WN8) на Рис. 8a. Перемещения AG Car не настолько кардинальны, однако, полностью соответствуют современным представлениям о переходах LBV. На Рис. 8a отмечен переход из абсолютного минимума (1989 г., три точки справа) в состояние локального минимума (2001 и 2002 гг., точки слева) по данным [8]. На диаграмме Рис. 8b [8, 17] группа самых верхних точек отмечают состояние абсолютного минимума (1989–начало 1990 гг.), самая нижняя точка — один из спектров абсолютного максимума (1995 г.), средние между ними точки есть промежуточное состояние 1991 г. и локальный минимум 2001 г.

Итак, перемещения AG Car и HD 5980 вдоль последовательности WNL очевидны. Звезда V 532 при увеличениях блеска неплохо вписывается в последовательность между низким/холодным состоянием LBV AG Car и LBV-эпизодом HD 5980. В низком/горячем состоянии все три звезды идеально согласуются с последовательностью WNL [26]. Однако, в целом, V 532 перемещается на диаграммах Рис. 8a–8b сложным образом.

На Рис. 8a–8b самая нижняя точка V 532 (спектр 15.10.92, абсолютный максимум блеска) показывает верхний предел возможной оценки эквивалентной ширины линии He II, эта линия отсутствует. За полуширину линии на Рис. 8b мы приняли спектральное разрешение данного спектра. Линия He I $\lambda 5876$ измерена надежно. Несмотря на отсутствие линии He II в спектре абсолютного максимума, верхний предел ее эквивалентной ширины, а также линия He I, указывают, что из состояний с меньшим блеском V 532 могла перейти в состояние абсолютного максимума через область WN11, в которой находится звезда AG Car. С другой стороны, в абсолютном минимуме блеска (2007 – 2008 и 2009 гг.) на рисунке Рис. 8a V 532 находится в крайне правом положении (область WN9), а на рисунке Рис. 8b в левом верхнем углу, это область ровно посередине между WN8 и WN9 (WN8.5).

Эволюция спектра V 532 со временем следующая. Сразу после абсолютного максимума звезда из области WN11 (“область LBV”) перемещается в область WN10-11 на Рис. 8a и также в область WN10-11 на Рис. 8b (1998 – 1999 гг., состояние перед локальным минимумом блеска), этот переход отмечен пунктиром на Рис. 8a–8b. Далее, в локальном минимуме (2000 – 2002 гг.), звезда движется в область WN9 в сторону ее положения в абсолютном минимуме. Далее поведение V 532 становится необычным при переходе к локальному максимуму блеска 2004 – 2005 гг. В это время линия He II заметно уширяется. На рисунке Рис. 8b звезда проходит область между двумя известными объектами WR 25 (HD 93162 WN6ha) и Sk $-67^\circ 22$

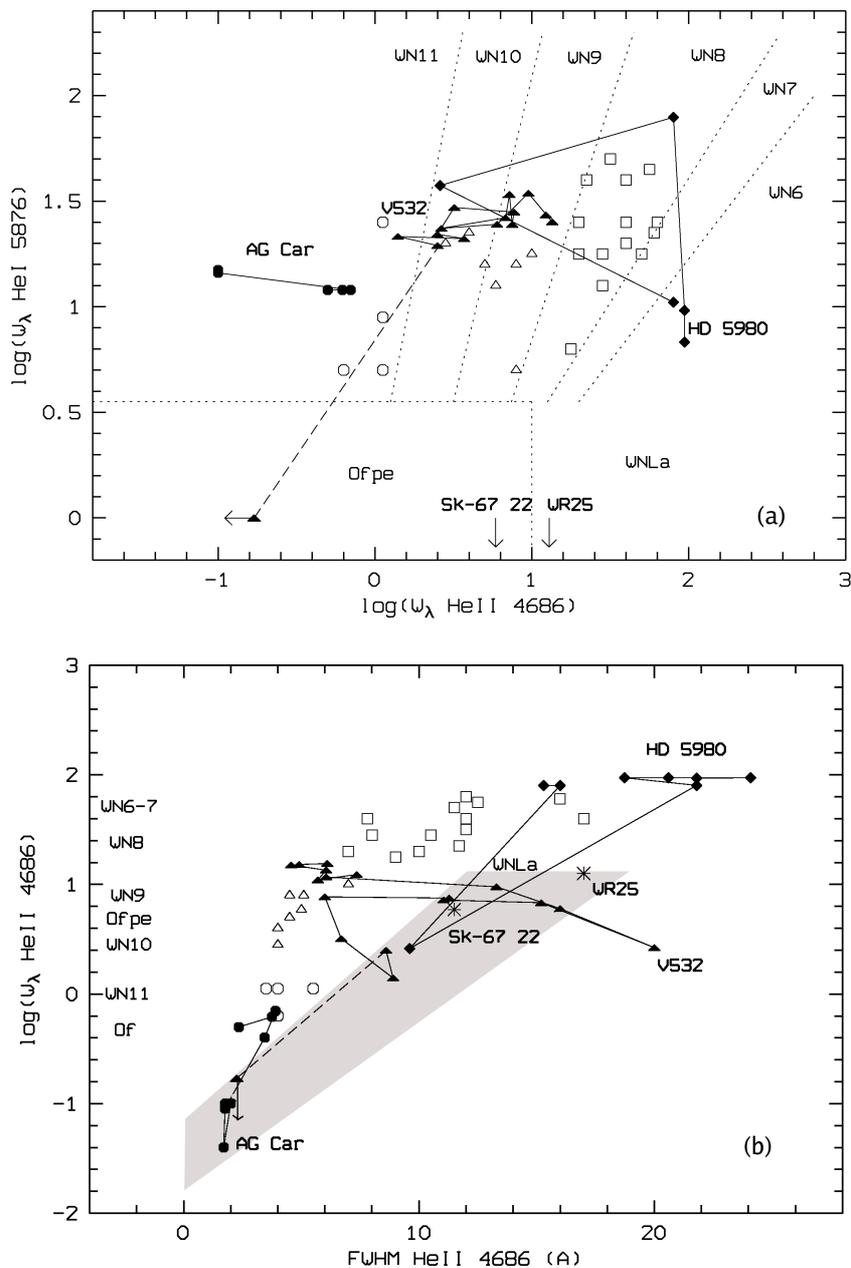


Рис. 8. Классификационные диаграммы из [26] для последовательности WNL. На них открытыми значками обозначены звезды WN8 (квадратики), WN9–10 (треугольники) и WN11 (кружки), а также звезды WR 25 и Sk –67° 22 (стрелки и звездочки). Также показаны перемещения звезд AG Car и HD 5980 во время их LBV–WNL переходов. В моменты минимумов визуального блеска в низком состоянии все три звезды очень хорошо вписываются в последовательность WNL-звезд. В моменты возрастания блеска все три звезды, AG Car, V 532 и HD 5980 формируют отдельную последовательность, которая не согласуется с последовательностью WNL [26] и выходит из нее. На нижнем рисунке эта новая последовательность отмечена серым фоном.

(O3 If/WN6), она выходит из основной последовательности WNL-звезд, ее спектральный класс становится (формально) WN9–10, на Рис. 8а в этом состоянии тип звезды становится WN10.

Звезды WR 25 и Sk –67°22 обладают очень

высокой светимостью и высоким содержанием водорода в атмосферах [26]. Температуры этих звезд достаточно высоки, линии HeI в их спектрах практически отсутствуют (Рис. 8а и [26]). Перемещение V 532 в сторону положения WR 25 и Sk –67° 22

на Рис. 8b связано не с уменьшением размера фотосферы и с соответствующим увеличением скорости убегания звезды (т.е. скорости ветра, как это, вероятно, есть у звезд WR 25 и Sk $-67^{\circ}22$), а с уширением линии HeII вследствие рассеяния света на электронах.

В 2004 – 2005 гг. размер фотосферы V 532 наоборот возрос, так как увеличился блеск звезды в визуальной области. Следуя простой логике, линия He II должна стать более узкой, так как уменьшилась скорость убегания звезды, но она уширилась. Это уширение вызвало перемещение V 532 в сторону от основной последовательности. Мы связываем уширение линии He II с рассеянием фотонов, отвечающих этой линии, на электронах. Самая крайняя точка на этом рисунке с FWHM(He II) $\sim 20 \text{ \AA}$ ненадежна, так как линия в это время заметно ослабела, кроме того, линия He II $\lambda 4686$ находится в сложной бленде. Ниже мы описываем двухкомпонентный профиль линии He II, однако на Рис. 8a–8b все измерения ширины сделаны в предположении однокомпонентного профиля. Остальные измерения ширины He II на этом рисунке вполне надежны.

В моменты возрастания визуального блеска все три звезды, AG Car, V 532 и HD 5980 формируют отдельную последовательность, которая не согласуется с последовательностью WNL [26] и выходят за ее пределы. В моменты минимумов визуального блеска все три звезды прекрасно вписываются в последовательность WNL-звезд. Этот результат представляется важным. Возможно, выход из WNL-последовательности связан с уширением линии HeII вследствие того же томсоновского рассеяния света при увеличении оптической толщины в этой линии, однако, возможно, что это новое свойство LBV-звезд, в высоком состоянии они не соответствуют самым поздним *bona fide* WNL-звездам. Мы знаем только три примера подобных переходов, естественно, нужны дополнительные наблюдения и новые объекты для более надежных выводов.

По спектральной классификации WN-звезд из [38] мы дополнительно определили по нескольким критериям спектральный класс V 532. Отношение интенсивностей линий HeII $\lambda 5412/\text{HeI } \lambda 5876$, определенное как отношение пик/континуум (первая линия имеет явный профиль типа P Cyg, поэтому отношение эквивалентных ширин дает неточный результат и большой разброс) оказывается равным 0.26 ± 0.02 , что означает класс WN8 (возможно, WN8.5). Интересно, что это отношение одинаково как в абсолютном минимуме блеска, так и в локальном максимуме 2004 – 2005 гг. В спектрах абсолютного минимума блеска отношение линий N V $\lambda 4604/\text{N III } \lambda 4640 \lesssim 0.05 - 0.08$, что также

указывает на спектральный класс WN8–9 [38]. Отношение N IV $\lambda 4058/\text{N III } \lambda 4640 \approx 0.14$ в состоянии абсолютного минимума (конкретно, по спектру Subaru за 08.10.07) также дает WN8–9. Линия CIV $\lambda 5808$ в этом минимуме не обнаружена, это также говорит о том, что звезда имеет класс WN8 или позднее. Величина относительного обилия $\text{H}^+/\text{He}^{++}$, рассчитываемая по отношению линий (H + He) отдельно как по 4861 \AA , так и по 4340 \AA к геометрическому среднему соседних с ними линий серии Пикеринга [38] оказывается равной 18 ± 6 , что означает подкласс по критерию наличия водорода “h”, т.е. явное наличие водорода.

3.4. Изменения температуры фотосферы и ветра

На Рис. 9 и 10 мы представляем изменение относительных интенсивностей основных линий со временем с 1999 по 2009 гг. В этом интервале наши наблюдения позволяют проследить изменения в спектре с изменением видимого блеска звезды. Относительные интенсивности получены из эквивалентных ширин линий, которые были исправлены за изменения блеска. Было принято, что во время абсолютного минимума блеска 2007 – 2008 гг. (со средним блеском $B = 18.38 \text{ mag}$, $V = 18.55 \text{ mag}$) звезда V 532 находится в своем истинном состоянии. Все эквивалентные ширины линий приведены к состоянию этого минимума блеска в полосе V или B, которому соответствует данная линия. При этом мы пользовались фотометрической кривой блеска, а в тех спектральных наблюдениях, где отсутствуют измерения в полосе V, мы использовали аппроксимацию, полученную выше, $B - V = 0.037 + 0.033(B - 16.0)^2 - 0.027(B - 16.0)^3$ (Рис. 3). Величина $I(B)$ на этих рисунках есть интенсивность излучения звезды в полосе B, приведенная к $B = 18.38 \text{ mag}$, то есть $I(B = 18.38) = 1$, и относительные интенсивности линий на Рис. 9, 10 и 12 есть их эквивалентные ширины умноженные на $I(B)$. На Рис. 9 показана эволюция линий He I и линии He II $\lambda 4686$, на следующем рисунке показана эволюция запрещенных линий [OIII] $\lambda 5007$, [NII] $\lambda 5755$, [FeIII] $\lambda 5270$ и разрешенной линии NII $\lambda 6482$. Примерное положение центра локального максимума блеска 2004 – 2005 гг. показано вертикальной пунктирной линией.

Самым заметным свойством переменности интенсивностей линий со временем является то, что все линии ведут себя примерно соответственно их потенциалам ионизации (или возбуждения, если это нейтральные атомы) и температуре фотосферы звезды. В локальном максимуме температура заметно падает, соответственно, интенсивность линий He I возрастает, интенсивность He II падает. Далее, при значительном увеличении температуры

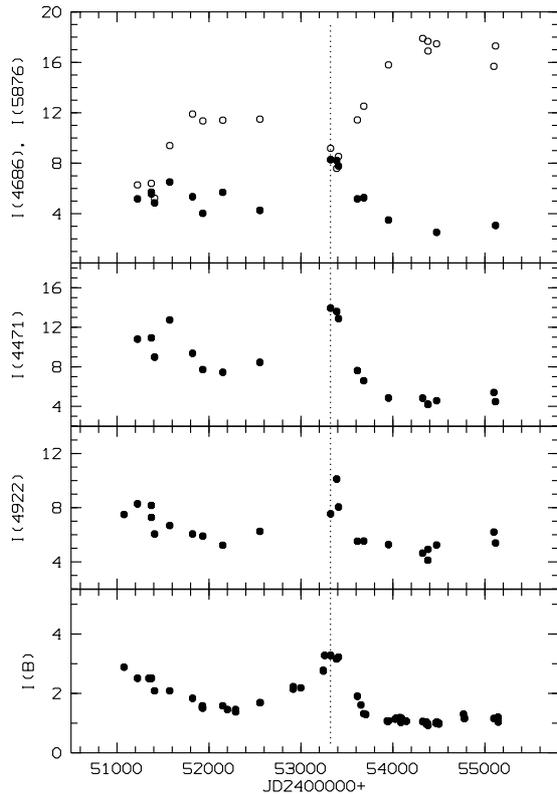


Рис. 9. Изменение относительных интенсивностей основных линий He I (заполненные кружки) и линии He II $\lambda 4686$ (незаполненные кружки) со временем с 1999 по 2009 гг. Эти относительные интенсивности есть эквивалентные ширины линий, исправленные за переменность блеска в соответствующем фильтре, например, $I = EW I(B)$ (см. текст). Внизу показана относительная интенсивность $I(B)$, которая нормирована на интенсивность в полосе В во время абсолютного минимума блеска. Примерное положение центра локального максимума блеска 2004 – 2005 гг. отмечено вертикальной пунктирной линией.

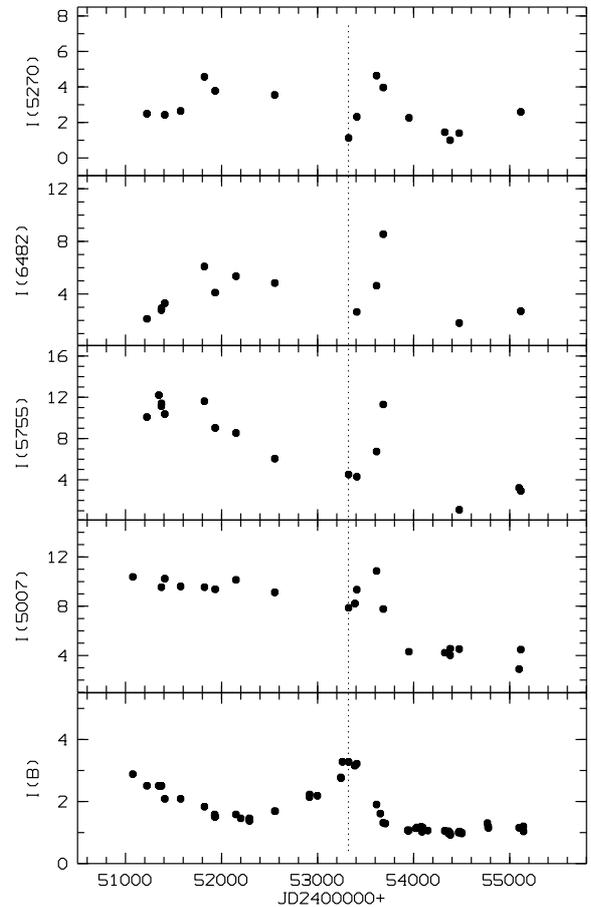


Рис. 10. Изменение относительных интенсивностей запрещенных линий [OIII] $\lambda 5007$, [NII] $\lambda 5755$, [FeIII] $\lambda 5270$ и разрешенной линии NII $\lambda 6482$. Остальное, как на Рис. 9.

фотосферы во время абсолютного минимума эти линии изменяются обратным образом. Потенциал первой ионизации атома гелия 24.6 эВ, (второй – 54.4 эВ), поэтому при увеличении температуры (Рис. 9 и 12) He I переходит в He II. Потенциалы ионизации ионов, показанных на Рис. 10 составляет 30–55 эВ, а чтобы достичь данной стадии ионизации, требуется 15–35 эВ. Соответственно примерно близости их потенциалов ионизации поведение линий на этом рисунке подобно, хотя условия формирования запрещенных и разрешенных линий, а также этих трех запрещенных линий ([NII], [FeIII], [OIII]) между собой различны. Подобное поведение существенно разных линий, представленных на Рис. 10, говорит о том, что эти линии формируются примерно на одном и том же расстоянии от фотосферы звезды и их поведение определяется изменением температуры фотосферы.

Локальный максимум 2004 – 2005 гг. достаточно острый, переход к состоянию абсолютного минимума быстрый, в противоположность медленно ослаблению блеска 1998 – 2001 гг. При переходе к абсолютному минимуму происходит быстрое увеличение температуры фотосферы, пик интенсивностей линий на Рис. 10 запаздывает относительно пика интенсивности континуума $I(B)$. Возникает ощущение, как будто “вспышка звезды” (локальный максимум 2004 – 2005 гг.) приводит к подсвечиванию и возбуждению далеких частей газовой оболочки вокруг V 532, которая была выброшена на более ранних стадиях активности [25]. Такая интерпретация представляется нам весьма спорной, так как в момент локального максимума температура фотосферы не возросла, а упала и достаточно заметно (см. ниже). Сами величины “запаздываний” очень велики, от 220 дней для [OIII]

и [FeIII] до 350 дней для [NII] $\lambda 5755$ (Рис. 10). Физические размеры такой оболочки соответствовали бы 0.2 – 0.3 пк, на таком расстоянии для заметной дополнительной ионизации газа необходима более мощная вспышка излучения.

Запаздывание пиков интенсивностей линий на Рис. 10, вероятно, связано с быстрым ростом температуры фотосферы V 532 после локального максимума. Интенсивности линий возрастают тогда, когда температура фотосферы становится оптимальной для данного иона. Действительно, разница в величинах запаздывания [OIII], [FeIII] и [NII] примерно соответствует (см. ниже Рис. 12) температурам фотосферы в моменты максимумов этих линий. Линии He I и He II на Рис. 9 также ведут себя соответственно температуре фотосферы звезды в любой момент времени (несмотря на то, что на Рис. 12 будет представлено изменение температуры V 532 со временем, подчеркнем, что в этой работе мы описываем качественное поведение температуры, для количественного анализа необходимы более детальные расчеты). Следовательно, оболочка вокруг звезды, в которой формируются все эти линии, компактна, это протяженная атмосфера звезды (ее ветер). Линия He II $\lambda 4686$ во время локального максимума блеска весьма слаба, но явно уширена, как обсуждалось выше (Рис. 8b). В состоянии абсолютного максимума эта линия очень яркая и имеет явный широкий компонент. Для Рис. 9 мы аппроксимировали эту линию как однокомпонентную, так как двухкомпонентный профиль He II можно надежно изучать только по спектрам с самым высоким отношением S/N, ниже мы обсудим широкий компонент 4686 и его поведение.

На Рис. 11 мы представляем фрагмент спектра V 532 (Subaru, 08.10.07, разрешение данного спектра 1.1 Å), включающий бленду Bowen и линию He II $\lambda 4686$ с примером двухкомпонентного Гаусс-анализа профиля последней линии. Для всех семи линий, представленных на рисунке, задавалась одна и та же полуширина FWHM (узкий компонент He II одна из этих семи линий), но для линии He II был добавлен широкий компонент, положение которого совпадает с положением узкого компонента. Было найдено, что у “узких” линий $\text{FWHM} = 4.15 \text{ \AA}$ (с учетом спектрального разрешения) или 270 км/с, а у широкого компонента на данном спектре $\text{FWHM} = 19.5 \text{ \AA}$ или 1250 км/с. Выше отмечалось, что средняя ширина широкого компонента этой линии He II по всем спектрам, у которых возможно было провести двухкомпонентный гаусс-анализ, составляет 1500 км/с.

Линия He II $\lambda 5412$ имеет абсорбционный компонент с голубой стороны (профиль типа P Cyg),

в линии 4686 Å нами не замечено такой детали. Кроме того, профиль линии 5412 Å узкий. Даже если предположить, что линия 5412 Å становится более узкой из-за того, что в голубой части ее профиля эмиссия пропадает из-за абсорбционного компонента, и достроить предполагаемый изначальный профиль He II $\lambda 5412$, то полуширина такого профиля будет никак не больше 10 Å (меньше 550 км/с). Выше мы объяснили появление широкого компонента в линии He II $\lambda 4686$ уширением за счет рассеяния квантов на электронах. Широкие компоненты появляются как у линий водорода, так и у линии He I $\lambda 5876$ в тех состояниях звезды, когда температура фотосферы оптимальна для формирования этих линий. Линии, в которых появляются широкие компоненты в профилях, определяются температурой плотных частей ветра в данном состоянии звезды. Отсутствие широкого компонента у линии 5412 Å мы объяснили существенно меньшей оптической толщиной этой линии по сравнению с линией 4686 Å, что наблюдается в ветрах WN-звезд [34]. Узкий профиль линии 5412 Å, а также наличие абсорбции в ее голубом крыле полностью согласуется с этим объяснением, то есть линия 5412 Å формируется существенно ближе к фотосфере звезды, чем линия 4686 Å. Малая ширина линии 5412 Å свидетельствует о том, что скорость ветра близко к фотосфере V 532 относительно мала и широкий компонент 4686 Å действительно появляется за счет томсоновского рассеяния света.

На Рис. 12 показано изменение интенсивностей широкого и узкого компонентов линии He II $\lambda 4686$, интенсивностей линий He II $\lambda 5412$ и бленды Боуэна (измерена в интервале длин волн 4605–4665 Å). Этот рисунок аналогичен Рис. 9 и 10, как и раньше, относительные интенсивности I линий получены из их эквивалентных ширин как $I = EW \times I(\text{V})$. Видно, что линия 5412 Å ведет себя не совсем так, как линия 4686 Å в целом (Рис. 9). Ее интенсивность максимальна во время абсолютного минимума, так же как и у линии 4686 Å, но в локальном максимуме 2004 г. ее интенсивность тоже велика (линия 4686 Å в это время слаба). Широкий компонент 4686 Å заметно усиливается во время абсолютного минимума, как и должно быть, если он формируется за счет томсоновского рассеяния. Узкий компонент 4686 Å во многом подобен по поведению линии 5412 Å, он не показывает такого сильного максимума в то время, когда температура фотосферы резко возрастает. Это также согласуется с идеей о формировании широкого компонента за счет рассеяния света на

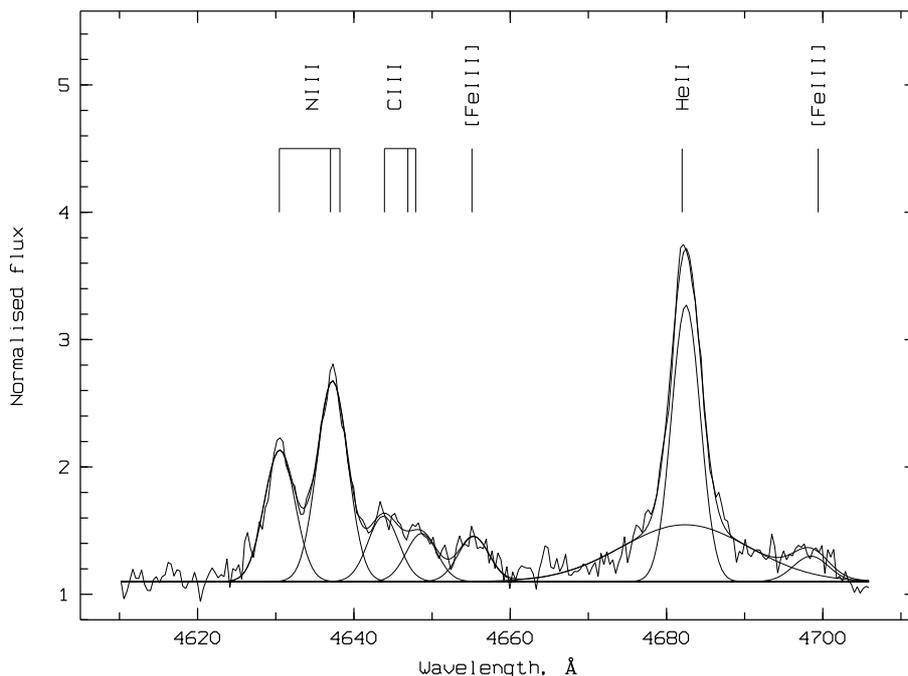


Рис. 11. Фрагмент спектра V 532 (Subaru, 08.10.07), включающий бленду Bowen и линию He II $\lambda 4686$ с примером двухкомпонентного Гаусс-анализа профиля последней линии.

электронах, так как в это время часть энергии в линии 4686 \AA перекачивается в ее широкий компонент. Поведение бленды Боуэна C III/N III согласуется с поведением температуры фотосферы. Оптимальная температура для формирования этой бленды ($30000 - 35000 \text{ K}$) заметно меньше, чем оптимальная температура для формирования линии He II $\lambda 4686$ (порядка 50000 K), поэтому во время абсолютного минимума интенсивность бленды C III/N III возрастает не так сильно, как интенсивность линии He II.

Интенсивность излучения от звезды в полосе В при температуре фотосферы V 532 порядка $30000 - 40000 \text{ K}$ (максимум излучения в спектре приходится на длины волн $700 - 1000 \text{ \AA}$) попадает в Релей-Джинсовскую часть спектра излучения, следовательно, мы можем пользоваться приближением $I(\nu) \propto TR^2$, где R —радиус фотосферы звезды, а T —температура ее фотосферы. В переменности LBV-звезд типа S Doг (но не в гигантских извержениях, которые были в звездах η Car и P Cyg) с определенной точностью выполняется условие $T^4 R^2 = \text{const}$. Таким образом, мы достаточно надежно можем оценивать температуру LBV-звезды по ее оптическому блеску, например, в полосе В, по соотношению $T \propto I(\nu)^{-1/3}$ при условии, что однажды температура была оценена независимо.

В работе [24] температура фотосферы V 532 была оценена как $T \sim 35000 \text{ K}$ путем аппроксимации ее SED по оптическим наблюдениям [27], полученным в период с осени 2000 по осень 2001, когда звезда была в состоянии промежуточного блеска ($B = 17.8$). Очевидно, что необходима более надежная оценка температуры звезды, чем эта. Мы планируем определить более надежно основные параметры V 532 в другой статье. Тем не менее, ход температуры со временем (Рис. 12), полученный на основе данной оценки, вполне согласуется с поведением линий разных потенциалов возбуждения и ионизации, представленным на Рис. 9, 10 и 12. Запаздывание пиков интенсивности линий, представленных на Рис. 10, вполне соответствует ходу температуры на Рис. 12. Ко времени максимальных интенсивностей линий [O III], [Fe III] и [N II] $\lambda 5755$ температура фотосферы увеличилась с примерно 30000 K до 38000 K . Далее, в абсолютном минимуме, температура фотосферы возросла еще сильнее, до величины порядка 42000 K и все эти ионы должны были перейти в следующую стадию ионизации, соответственно, интенсивности этих линий резко ослабли.

3.5. Изменения скорости ветра, ускорение ветра наружу

В этом параграфе мы оценим скорость ветра в V 532 и ее изменения в зависимости от состояния

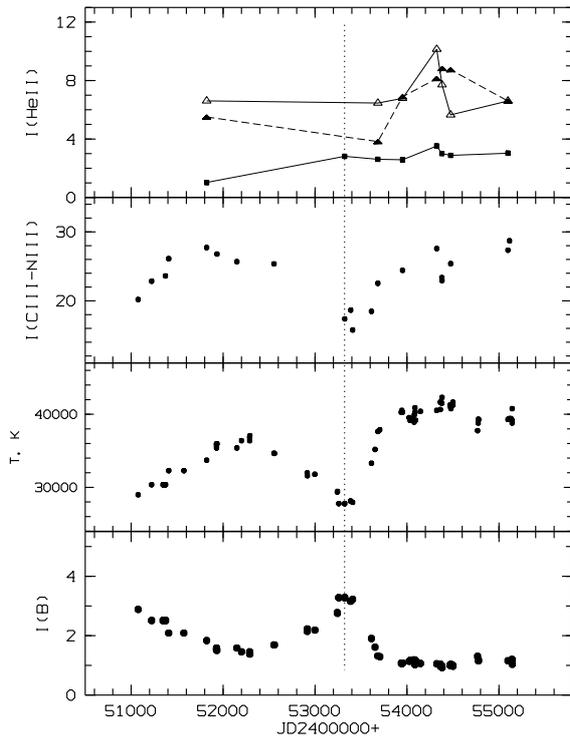


Рис. 12. Изменение интенсивностей широкого (незаполненные треугольники) и узкого (заполненные треугольники) компонентов линии He II $\lambda 4686$, интенсивностей линий He II $\lambda 5412$ (точки) и бленды Боуэна со временем. Показано также поведение температуры фотосферы V 532 (см. текст для деталей). Остальное, как на Рис. 9.

звезды, то есть ее блеска. Под скоростью ветра мы будем понимать разницу скоростей между ядром линии поглощения и пиком линии излучения ΔV_{ae} , измеренную по профилям P Cyg разных линий в разных состояниях звезды. Величина ΔV_{ae} не является точной скоростью ветра, но прямо с ней связана. Кроме того, ΔV_{ae} фиксирует скорость расширения атмосферы в месте образования данной линии. Конечная или терминальная скорость ветра обычно несколько больше скорости убегания звезды ($V_{esc} = \sqrt{2GM/R}$), но так же прямо с ней связана.

Используя простые соотношения, описанные в предыдущем параграфе, мы можем найти, что $V_{esc} \propto I(B)^{-1/3}$, то есть она зависит от оптического блеска так же как и температура фотосферы. В отличие от зависимостей $T \propto I(B)^{-1/3}$ и $R \propto I(B)^{2/3}$, которые должны выполняться для звезд LBV, зависимость $V_{esc} \propto I(B)^{-1/3}$ вполне может быть неточной, так как конечная скорость ветра зависит от ряда условий в атмосфере. Тем более, если отождествлять V_{esc} с ΔV_{ae} , которую мы мо-

жем измерять прямо, то есть использовать соотношение $\Delta V_{ae} \propto I(B)^{-1/3}$, можно допустить заметную количественную ошибку. Но качественно, при увеличении размера фотосферы звезды (который зависит от оптического блеска как $R \propto I(B)^{2/3}$) скорость ветра должна уменьшаться.

На Рис. 13 приведено изменение скорости ветра V 532, измеренной как ΔV_{ae} , со временем. Скорость измерена по всем имеющимся у нас спектрам и во всех линиях, показывающих профиль типа P Cyg. Если в спектрах есть много линий одного типа (например, линий водорода или He I) с профилем P Cyg, то, чтобы не загромождать рисунок, показаны результаты измерений только тех линий, у которых абсорбционное ядро можно измерить наиболее надежно. На этом же рисунке показано изменение $I(B)$ со временем, для удобства величина $I(B)$ умножена на коэффициент 20. Мы видим, что в состоянии абсолютного максимума блеска скорость ветра самая низкая. В это время профиль типа P Cyg различим только у линий водорода. Скорость расширения атмосферы выше в линии $H\alpha$ чем в линии $H\beta$, что естественно, так как первая линия формируется в среднем в более высоких слоях атмосферы. В состоянии промежуточного блеска и во время локального максимума 2004 – 2005 гг. профиль P Cyg показывали только линии He I, причем как синглеты, так и триплеты. В состоянии абсолютного минимума профиль P Cyg наблюдался у линий He I, He II $\lambda 5412$ и у линии водорода $H\delta$. Важно, что в этом состоянии профиль P Cyg показывали только триплетные линии He I, что связано с отличием от синглетных в их формировании. Мы видим (Рис. 13), что в состоянии абсолютного минимума наблюдается ясная зависимость между потенциалом возбуждения перехода и скоростью ΔV_{ae} , чем выше потенциал, тем меньше скорость ветра.

На Рис. 14 мы показываем зависимость скорости расширения атмосферы от относительной интенсивности оптического блеска. Видно, что с уменьшением блеска $I(B)$, то есть с уменьшением размера фотосферы скорость расширения ветра явно возрастает. Как было отмечено выше, радиус LBV-звезды вполне хорошо определяется зависимостью $R \propto I(B)^{2/3}$, но скорость расширения ветра только весьма условно может быть выражена зависимостью $\Delta V_{ae} \propto I(B)^{-1/3}$, тем более, что величина ΔV_{ae} определяет только скорость расширения в области формирования данной линии. Тем не менее, скорости расширения, измеренные по линии $H\alpha$ в состоянии абсолютного максимума, линиям He I в промежуточном состоянии и линии He II $\lambda 5412$ в состоянии абсолютного минимума вполне соответствуют зависимости $\Delta V_{ae} \propto I(B)^{-1/3}$. В каждом из

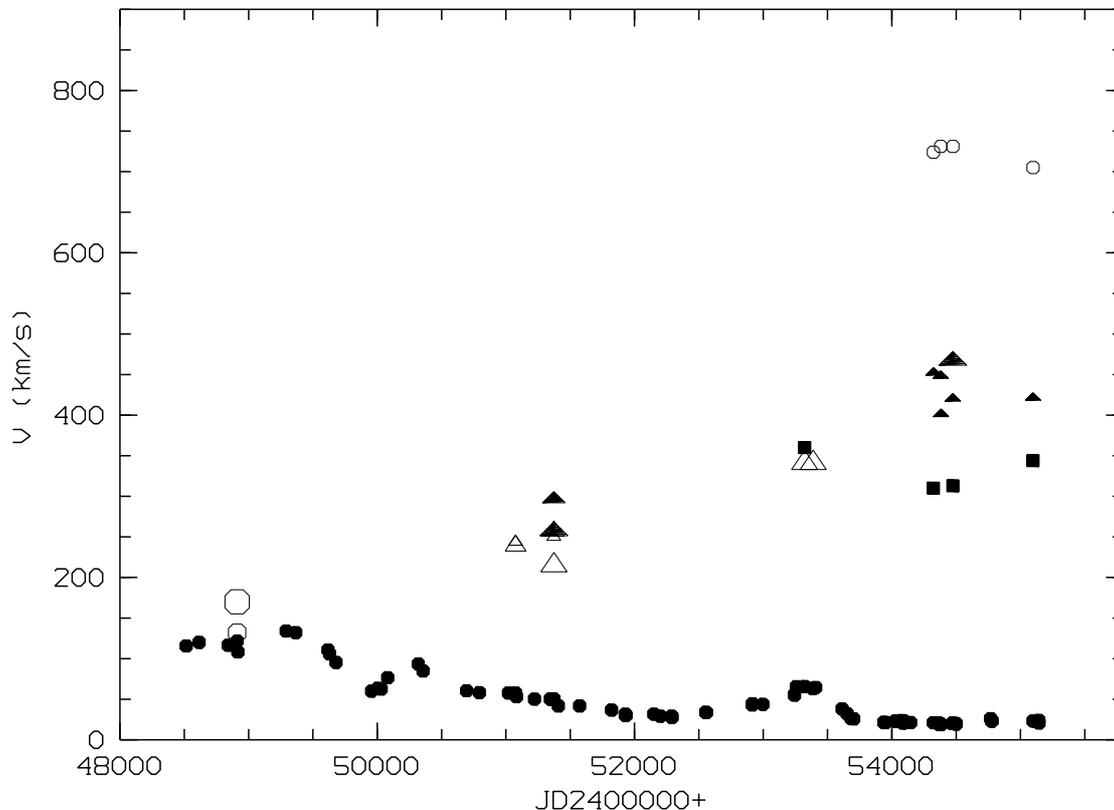


Рис. 13. Изменение скорости ветра V 532, измеренной как ΔV_{ae} , со временем. Заполненными кружками показана зависимость $I(V)$ от времени, для удобства просмотра величина $I(V)$ умножена на коэффициент 20. Скорость измерена по всем имеющимся у нас спектрам и во всех линиях, показывающих профиль типа P Cyg. Большой незаполненный кружок—линия $H\alpha$, средний кружок—линия $H\beta$, малые кружки—линия $H\delta$, большие незаполненные треугольники— $He I \lambda 6678$, средние незаполненные треугольники— $He I \lambda 5015$, малые незаполненные треугольники— $He I \lambda 4922$, большие заполненные треугольники— $He I \lambda 5876$, средние заполненные треугольники— $He I \lambda 4713$, малые заполненные треугольники— $He I \lambda 4471$, заполненные квадратики— $He II \lambda 5412$. Разные линии показывают профиль типа P Cyg в зависимости от соответствия их потенциала возбуждения/ионизации текущему значению температуры фотосферы (см. Рис. 9,10,12). Во время абсолютного минимума блеска профили типа P Cyg имеют только триплетные линии He I.

этих состояний эти линии формируются во внутренних частях ветра, возможно по этой причине выполняется это простое соотношение (однако, линия $H\alpha$ в состоянии максимального блеска формируется выше линии $H\beta$).

В состоянии абсолютного минимума блеска мы видим кинематический разрез атмосферы (Рис. 13 и 14): самая малая скорость расширения ветра (330 – 350 км/с) наблюдается у линии $He II \lambda 5412$, средняя в этом состоянии скорость расширения (400 – 470 км/с) наблюдается у триплетных линий He I, максимальная скорость расширения ветра (700 – 730 км/с) наблюдается у линии $H\delta$. Интерпретация этой зависимости очевидна, скорость ветра возрастает наружу по мере ускорения ветра. Кроме того, она явно показывает, что температура ветра в протяженной атмосфере V 532 падает с

расстоянием от звезды. Температура газа в ветре может определяться многими факторами. Они определяют энергетический баланс между скоростью нагрева за счет излучения (возможен и нагрев за счет ударных волн, если таковые присутствуют в ветрах LBV) и скоростью охлаждения газа. Охлаждение газа происходит как за счет излучения, так и за счет расширения. Так или иначе, но мы можем уверенно заключить, что в спектрах V 532 во время ее абсолютного минимума мы нашли явные свидетельства ускорения и охлаждения ветра этой звезды с увеличением расстояния от фотосферы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье мы представили результаты наиболее полной спектроскопии LBV-звезды V 532

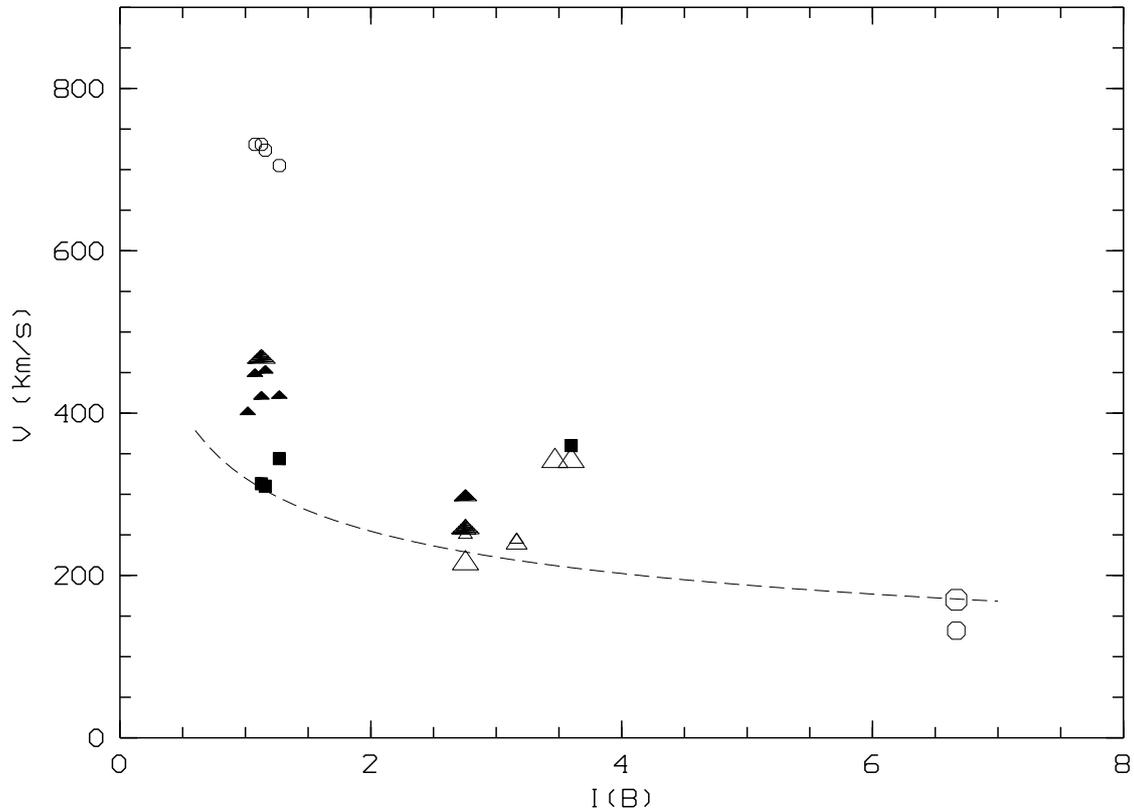


Рис. 14. Зависимость скорости расширения атмосферы от относительной интенсивности оптического блеска. Обозначения те же, что на предыдущем рисунке. В состоянии абсолютного минимума блеска виден кинематический разрез атмосферы (ветра), температура ветра падает с увеличением расстояния от фотосферы, чем ниже температура газа в ветре, тем выше скорость расширения атмосферы. Скорость расширения ветра зависит от ряда факторов и только весьма условно может быть выражена простой зависимостью $\Delta V_{ae} \propto I(B)^{-1/3}$, которая показана штриховой линией. Величина ΔV_{ae} определяет скорость расширения в области формирования данной линии.

в галактике М 33. Спектры покрывают как абсолютный максимум визуального блеска звезды 1992 – 1994 гг. (высокое/холодное состояние), так и абсолютный минимум блеска 2007 – 2008 гг. (низкое/горячее состояние). Разница блеска между этими экстремумами составила $\Delta B \approx 2.3$ mag. Помимо крайних состояний блеска V 532, спектральные наблюдения покрывают также локальный минимум и максимумы блеска 1998 – 2006 гг. Переменность спектра V 532 полностью соответствует изменениям температуры ее фотосферы в зависимости от визуального блеска ($T \propto I(B)^{-1/3}$) в полосе В.

Следуя оценке температуры фотосферы звезды [24] $T \sim 35000$ К, полученной по данным, когда звезда была в промежуточном состоянии блеска ($B = 17.8$), в абсолютном минимуме ее температура достигала $T \sim 42000$ К, в то время как в абсолютном максимуме фотосфера охлаждалась до $T \sim 22000$ К. Несмотря на то, что эти оценки

температур фотосферы достаточно грубы (необходимо специальное моделирование спектра V 532), появление, изменение и исчезновение основных линий в спектре звезды полностью соответствуют их потенциалам ионизации (возбуждения в случае нейтральных атомов) и текущей температуре фотосферы. Даже запрещенные линии [OIII], [FeIII], [ArIII] и [NII] $\lambda 5755$ ведут себя соответственно линиям разрешенным и следуют той же зависимости от температуры фотосферы. Мы делаем вывод, что оболочка вокруг звезды, в которой формируются все эти линии, относительно компактна, это протяженная атмосфера звезды (ее ветер). В отличие от линии [NII] $\lambda 5755$, линия [NII] $\lambda 6583$ принадлежит протяженной туманности размером десятки пк [21], которая, тем не менее, попадает в щель спектрографа и не полностью вычитается.

Мы обнаружили эволюцию широких компонент наиболее ярких линий. Они появляются в спектре звезды у наиболее интенсивных линий водорода,

HeI и HeII $\lambda 4686$, их ширина от 1100 до 1800 км/с. Широкие компоненты также ведут себя соответственно температуре фотосферы, в высоком состоянии появляется широкий компонент в линиях водорода, при повышении температуры звезды широкие крылья пропадают. В промежуточном состоянии блеска появляется широкий компонент в линии HeI $\lambda 5876$, который не наблюдается в более горячем или более холодном состояниях. В низком состоянии V 532 появляются широкие крылья линии HeII $\lambda 4686$, но они не наблюдаются в линии того же иона HeII $\lambda 5412$. Из этого следует, что широкие компоненты появляются в линиях с максимальной оптической толщиной и только в тех состояниях/линиях, когда температура фотосферы оптимальна для возбуждения данного перехода. Следовательно, широкие компоненты никак не связаны с вращением звезды или с доплеровским уширением линий в ветре, так как присутствуют яркие узкие компоненты в тех же профилях линий. Появление широких крыльев линий связано с уширением за счет рассеяния света в самых плотных и близких к фотосфере частях ветра.

Эмиссия HeII $\lambda 5412$ в спектре V 532 относительно узкая, и в ее профиле, в отличие от линии 4686 Å, присутствует абсорбционный компонент, смещенный в голубую сторону. Отсутствие широкого компонента у линии 5412 Å мы объяснили существенно меньшей оптической толщиной этой линии по сравнению с линией 4686 Å, что наблюдается в ветрах WN-звезд [34]. Узкий профиль линии 5412 Å, а также наличие абсорбции в ее голубом крыле полностью согласуется с этим объяснением, то есть линия 5412 Å формируется существенно ближе к фотосфере звезды, чем линия 4686 Å. Малая ширина линии 5412 Å свидетельствует о том, что скорость ветра близко к фотосфере V 532 относительно мала и широкий компонент 4686 Å действительно появляется за счет томсоновского рассеяния излучения.

Лучевая скорость V 532 составляет -184 ± 3 км/с и неизменна с точностью несколько км/с, это найдено по двум лучшим спектрам с лучшим спектральным разрешением, полученным с разницей по времени 15 лет. Скорость ветра V 532, измеренная как ΔV_{ae} меняется со временем. Скорость измерена по всем имеющимся у нас спектрам и во всех линиях, показывающих профиль типа P Cug. Скорость ветра явно зависит от радиуса фотосферы звезды (который достаточно хорошо определяется зависимостью $R \propto I(V)^{2/3}$), то есть от величины визуального блеска звезды. С уменьшением блеска $I(V)$ или с уменьшением размера фотосферы скорость расширения ветра возрастает. Это обнаружено по разным линиям, так

как при изменении температуры фотосферы разные линии показывают профиль типа P Cug.

В состоянии абсолютного минимума блеска нам удалось найти кинематический разрез атмосферы V 532. Самая малая скорость ветра (330 – 350 км/с) наблюдается по линии HeII $\lambda 5412$, средняя скорость (400 – 470 км/с) наблюдается по триплетным линиям HeI, максимальная скорость ветра (700 – 730 км/с) наблюдается у линии H δ . Из этого следует, что скорость ветра возрастает наружу и что температура ветра в протяженной атмосфере V 532 падает с расстоянием от звезды.

В промежуточном состоянии блеска в 1998 – 2001 гг. в [21] было найдено, что спектральный тип звезды соответствует WN10-11. При этом были использованы количественные спектральные критерии, введенные в [26]. Когда звезда находилась в низком/горячем состоянии, Polcaro et al. [20], используя критерии из той же работы [26], нашли, что спектральный класс звезды близок к WN8-9, то есть в зависимости от величины визуального блеска спектральный класс V 532 меняется между WN11 и WN8-9. Мы подтверждаем эти результаты на основе более представительного набора спектров. Используя критерии спектральной классификации WN-звезд [38] мы определили по нескольким критериям спектральный класс V 532 в низком состоянии как WN8.5h.

По диаграммам Crowther and Smith [26] мы проследили эволюцию V 532 совместно с эволюцией двух других звезд LBV нашей Галактики — AG Car и WR-компонента массивной двойной системы HD 5980 в галактике SMC. AG Car за последние годы показала переход типа LBV \leftrightarrow WNL. HD 5980 показала обратный переход, точнее, LBV-эпизод WN3 \rightarrow WN11(LBV) \rightarrow WN4/5 осенью 1994 г. Таким образом сейчас известны только три объекта, V 532, AG Car и HD 5980, которые можно детально изучать в их переходах типа LBV \leftrightarrow \leftrightarrow WNL. Мы нашли, что во время минимумов визуального блеска все три звезды прекрасно вписываются в последовательность WNL-звезд [26]. Однако, в моменты возрастания визуального блеска, все три звезды AG Car, V 532 и HD 5980 формируют отдельную последовательность, которая не согласуется с последовательностью WNL [26] и выходят за ее пределы. При этом V 532 как в локальном максимуме, так и при возрастании визуального блеска попадает на эту новую отдельную последовательность.

Выход из WNL-последовательности при возрастании блеска связан с уширением линии HeII $\lambda 4686$, когда ее полуширина не соответствует ее эквивалентной ширине, требуемой чтобы

оставаться в рамках WNL-последовательности. Возможно, это связано с более плотным, чем у WNL-звезд, ветром, то есть с уширением линии за счет рассеяния света на свободных электронах при увеличении оптической толщи в этой линии. Возможно, что это новое свойство LBV-звезд, когда в высоком/холодном состоянии они не соответствуют самым поздним *bona fide* WNL-звездам. Мы знаем только три примера подобных переходов и нужны дополнительные наблюдения и новые объекты для более надежных выводов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Т. Зейферту за предоставленные спектры, А. Князеву за спектральные наблюдения на SAFOS на 2.2-м телескопе Calar-Alto и обработку полученных спектров, Е.А. Барсуковой за помощь в фотометрических наблюдениях и за обработку спектров, Е.Л. Ченцову за полезные обсуждения. Работа поддержана грантами РФФИ 09-02-00163, 10-02-00463, “Ведущие научные школы России” № 5473.2010.2 и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 годы, П1244.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **106**, 1025 (1994).
2. A. M. van Genderen, *Astronom. and Astrophys.* **366**, 508 (2001).
3. N. Smith and P. S. Conti, *Astrophys. J.* **679**, 1467 (2008).
4. T. Szeifert, *LIACo* **33**, 459 (1996).
5. J. S. Clark, V. M. Larionov, and A. Arkharov, *Astronom. and Astrophys.* **435**, 239 (2005).
6. L. J. Smith, P. A. Crowther, and R. K. Prinja, *Astronom. and Astrophys.* **281**, 833 (1994).
7. N. R. Walborn, *Astrophys. J.* **215**, 53 (1977).
8. J. H. Groh, D. J. Hillier, A. Daminieli, et al., *Astrophys. J.* **698**, 1698 (2009).
9. G. Koenigsberger, L. Georgiev, D. J. Hillier, et al., *Astronom. J.* **139**, 2600 (2010).
10. N. M. Artyukhina et al., *General Catalog of Variable Stars* (Kosmosinform, Moscow, 1995).
11. G. Romano, *Astronom. and Astrophys.* **67**, 291 (1978).
12. A. S. Sharov, *Sov. Astron.* **34**, 364 (1990).
13. R. Kurtev, O. Sholukhova, J. Borissova, and L. Georgiev, *IBVS* **4922**, 1 (2000).
14. R. Kurtev, O. Sholukhova, J. Borissova and L. Georgiev, *Rev. Mex. Astronom. and Astrophys.* **37**, 57 (2001).
15. O. Sholukhova, A. Zharova, S. Fabrika, and D. Malinovskii, *ASPC* **259**, 522 (2002).
16. A. Zharova, V. Goranskij, O. N. Sholukhova, and S. N. Fabrika, *Peremennye Zvezdy Prilozhenie*, **11**, no. 11 (2011).
17. O. Stahl, I. Jankovics, J. Kovács, et al., *Astronom. and Astrophys.* **375**, 54 (2001).
18. O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, V. V. Vlasyuk, and A. N. Burenkov, *Astron. Lett.* **23**, 458 (1997).
19. S. Fabrika, *ASPC* **204**, 57 (2000).
20. V. F. Polcaro, R. Gualandi, L. Norci, et al., *Astronom. and Astrophys.* **411**, 193 (2003).
21. S. Fabrika, O. Sholukhova, T. Becker, et al., *Astronom. and Astrophys.* **437**, 217 (2005).
22. R. F. Viotti, C. Rossi, V. F. Polcaro, et al., *Astronom. and Astrophys.* **458**, 225 (2006).
23. R. F. Viotti, S. Galleti, R. Gualandi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **464**, L53 (2007).
24. A. F. Valeev, O. Sholukhova, and S. Fabrika, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **396**, L21 (2009).
25. V. F. Polcaro, R. F. Viotti, C. Rossi, et al., arXiv:1010.2136.
26. P. A. Crowther and L. J. Smith, *Astronom. and Astrophys.* **320**, 500 (1997).
27. P. Massey, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, et al., *Astronom. J.* **131**, 2478 (2006).
28. A. S. Sharov, A. Alksnis, A. V. Zharova, and Y. A. Shokin, *Astron. Lett.* **26**, 433 (2000).
29. R. M. Humphreys, *Astrophys. J.* **241**, 587 (1980).
30. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005).
31. K. Kubota, Y. Ueda, S. Fabrika, et al., *Astrophys. J.* **709**, 1374 (2010).
32. S. Fabrika, *ASPRv* **12**, 1 (2004).
33. Y. A. Fadeyev, *Astron. Lett.* **36**, 362 (2010).
34. W.-R. Hamann, L. Koesterke, and U. Wessolowski, *Astronom. and Astrophys.* **299**, 151 (1995).
35. R. H. Barba, V. S. Niemela, G. Baume, and R. A. Vazquez, *Astrophys. J.* **446**, L23 (1995).
36. M. Heydari-Malayeri, G. Rauw, O. Esslinger, and J.-L. Beuzit, *Astronom. and Astrophys.* **322**, 554 (1997).
37. C. Foellmi, et al., *Rev. Mex. Astronom. and Astrophys.* **44**, 3 (2008).
38. L. F. Smith, M. M. Shara, and A. F. J. Moffat, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **281**, 163 (1996).

SPECTRAL VARIABILITY OF LBV STAR V 532 (ROMANO'S STAR)**O.N. Sholukhova, S.N. Fabrika, A.V. Zharova, A.F. Valeev, V.P. Goranskij**

We present the results of studying the spectral and photometric variability of the luminous blue variable star V 532 in M 33. The photometric variations are traced from 1960 to 2010, spectral variations—from 1992 to 2009. The star has revealed an absolute maximum of visual brightness (1992–1994, high/cold state) and an absolute minimum (2007–2008, low/hot state) with a brightness difference of $\Delta B \approx 2.3^m$. The temperature estimates in the absolute maximum and absolute minimum were found to be $T \sim 22000$ K and $T \sim 42000$ K, respectively. The variability of the spectrum of V 532 is fully consistent with the temperature variations in its photosphere, while both permitted and forbidden lines are formed in an extended stellar atmosphere. Broad components of the brightest lines were found, the broadening of these components is due to electron scattering in the wind parts closest to the photosphere. We measured the wind velocity as a difference between the emission and absorption peaks in the P Cyg type profiles. The wind velocity clearly depends on the size of the stellar photosphere or on the visual brightness, when brightness decreases, the wind velocity increases. In the absolute minimum a kinematic profile of the V 532 atmosphere was detected. The wind velocity increases and its temperature declines with distance from the star. In the low/hot state, the spectral type of the star corresponds to WN8.5h, in the high/cold state — to WN11. We studied the evolution of V 532 along with the evolution of AG Car and the massive WR binary HD 5980 in SMC. During their visual minima, all the three stars perfectly fit with the WNL star sequence by Crowther and Smith (1997). However, when visual brightness increases, all the three stars form a separate sequence. It is possible that this reflects a new property of LBV stars, namely, in the high/cold states they do not pertain to the *bona fide* WNL stars.

Key words: *Stars: massive — stars: individual: V532*