

УДК 524.338.3-76

**V2324 Cyg — F-ЗВЕЗДА С БЫСТРЫМ ВЕТРОМ**

© 2008 В. Г. Клочкова\*, Е. Л. Ченцов\*\*, В. Е. Панчук\*\*\*

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 29 января 2008 г.; принята в печать 20 февраля 2008 г.

Впервые выполнена оптическая спектроскопия с высоким спектральным разрешением переменной V2324 Cyg, ассоциируемой с ИК-источником IRAS 20572+4919. В области длин волн от 4549 до 7880 Å отождествлено свыше 200 абсорбций (в основном Fe II, Ti II, Cr II, Y II, Ba II, Y II). Определены спектральный класс F0 III и скорость вращения  $V \sin i = 69$  км/с. Линии нейтрального водорода и D-линии NaI имеют сложный профиль типа P Cyg. Ни систематический ход лучевой скорости  $V_r$  с глубиной линии  $R_\odot$ , ни временная переменность  $V_r$  не обнаружены. Определено среднее значение гелиоцентрической лучевой скорости  $V_r = -16.8 \pm 0.6$  км/с. Скорости по ядрам абсорбционных компонентов ветровых линий H $\beta$  и NaI колеблются от  $-140$  до  $-225$  км/с (а скорости расширения соответствующих слоев — примерно от 120 до 210 км/с). Максимальная скорость расширения получена по синему компоненту расщепленной абсорбции H $\alpha$ : 450 км/с для даты 12.12.95. Методом моделей атмосфер определены параметры: эффективная температура  $T_{eff} = 7500$  К, ускорение сила тяжести  $\log g = 2.0$ , микротурбулентная скорость  $\xi_t = 6.0$  км/с и солнечная металличность. Основной особенностью химического состава звезды является избыток лития и натрия. Принадлежность V2324 Cyg к post-AGB-звездам поставлена под сомнение.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Малоизученная переменная звезда V2324 Cyg (видимая звездная величина  $V = 11.63^m$ , показатели цвета  $B - V = +1.09^m$ ,  $U - B = +0.58^m$ , галактические координаты  $l = 89.44^\circ$ ,  $b = +2.39^\circ$ ) является оптическим компонентом ИК-источника IRAS 20572+4919. Наблюдаемый избыток излучения в области 12–60 мкм и положение на диаграмме ИК-цветов позволяют считать этот объект кандидатом в молодые планетарные туманности с пылевой оболочкой [1]. Согласно современным представлениям (см., например, [2]) на кратковременной эволюционной стадии молодой планетарной (протопланетарной) туманности (PPN) наблюдаются звезды промежуточных масс, которые эволюционируют от стадии асимптотической ветви гигантов (AGB) к стадии планетарной туманности. Исходная масса этих звезд на Главной последовательности находится в интервале 3–8  $M_\odot$ . На предшествующей стадии AGB эти звезды испытали большую потерю вещества в виде мощного звездного ветра, вследствие чего протопланетарная туманность представляет собой вырожденное углеродно-кислородное ядро с типичной массой около 0.6  $M_\odot$ , окруженное

расширяющейся газопылевой оболочкой. Интерес астрономов к PPN обусловлен, во-первых, возможностью изучать историю потери вещества за счет звездного ветра, а во-вторых, уникальной возможностью наблюдать результат звездного нуклеосинтеза, процессов перемешивания и выноса в поверхностные слои продуктов ядерных реакций в предшествующей эволюции звезды.

Повышенное внимание астрономов к PPN в течение последнего десятилетия привело к ряду интересных результатов. Среди выборки кандидатов в PPN было выявлено около дюжины объектов с избытками тяжелых металлов, синтез которых идет за счет нейтронизации ядер железа в условиях низкой плотности нейтронов (так называемый s-процесс). Необходимые физические условия для эффективного s-процесса и последующего выноса в поверхностные слои обогащенного тяжелыми ядрами вещества обеспечиваются именно в звездах на стадии AGB (см. историю и современное понимание проблемы в обзоре Буссо и др. [3]). Из анализа спектров выборки PPN выяснилось, что ожидаемые избытки элементов s-процесса наблюдаются в атмосферах тех PPN, атмосферы которых обогащены углеродом, и в ИК-спектрах которых имеется эмиссия на длине волны 21 мкм [4–7]. Подавляющее же число PPN не имеют ни избытка углерода (O-rich звезды), ни избытка тяжелых металлов (см., например, [4, 9, 44]). Обнаруженная

\*E-mail: valenta@sao.ru

\*\*E-mail: echen@sao.ru

\*\*\*E-mail: panchuk@sao.ru

корреляция между избытком тяжелых металлов в атмосфере звезды и особенностью ИК-спектра оболочки этой звезды требует объяснения, а следовательно, и расширения выборки изученных PPN.

О свойствах звезды V2324 Cyg к настоящему времени известно немного. Архипова и др. [10, 11] по многолетним UVB-наблюдениям обнаружили переменность блеска V2324 Cyg с амплитудой  $\approx 0.3^m$  в полосе U и  $\approx 0.2^m$  в полосах V и B. Важным является вывод в работе Архиповой и др. [11] об отсутствии явно выраженной пульсационной периодичности в переменности блеска звезды. Переменность блеска объяснена авторами влиянием звездного ветра. Отсутствие пульсаций согласуется с достаточно ранним спектральным классом звезды — A3 I [11]. Отметим, что в базе данных SIMBAD приведено другое значение спектрального класса,  $S_p = Fe$ . В поляриметрическом обзоре [12] источник IRAS 20572+4919 отнесен к объектам без поляризации, что может указывать на сферичность околозвездной оболочки. Хривнак и др. [13], изучая спектры выборки PPN в ближнем ИК-диапазоне, обратили внимание на аномальный (плоский) вид ИК-спектра и на отсутствие абсорбционных линий водорода серии Брэккета в спектре IRAS 20572+4919. Позже, изучая выборку PPN в ближней ИК-области 2.1–2.3 мкм, Келли и Хривнак [14] классифицировали центральную звезду источника как F-звезду и отнесли ее к малочисленной группе звезд с эмиссией в линии  $Brg$ . В работе [15], где по данным ИК-фотометрии определен эволюционный статус 225-ти IRAS-источников, классификацию источника IRAS 20572+4919 в качестве “post-AGB”-звезды авторы считают неуверенной (tentative).

Спектральные наблюдения V2324 Cyg в оптическом диапазоне выполнялись до сих пор только с низким спектральным разрешением, но и при низком разрешении были выявлены основные особенности оптического спектра V2324 Cyg — эмиссия в D-линиях NaI и особенно мощная эмиссия в  $H\alpha$ . Эмиссия в  $H\alpha$  обнаружена более 30-ти лет назад [16]. Наличие эмиссий естественно связывается с присутствием околозвездной оболочки, которая в оптическом спектре оказывает влияние на профили  $H\alpha$  и D-линий NaI. Недавно опубликован спектр V2324 Cyg с разрешением около  $2\text{ \AA}$  [17], на котором видно, в частности, наличие эмиссии и в линиях триплета кислорода OI  $\lambda 7773\text{ \AA}$ .

В данной статье мы представляем результаты спектрального мониторинга V2324 Cyg с высоким спектральным разрешением, выполненного на 6-м телескопе БТА. Цель наших исследований — выявление вероятной спектральной переменности, а также изучение поля скоростей в атмосфере и оболочке звезды, определение фундаментальных

**Таблица 1.** Журнал наблюдений V2324 Cyg на 6-м телескопе

Дата	UT	$\Delta T$ , сек	$\Delta\lambda$ , $\text{\AA}$	Спектрограф
12.12.95	16:24	6400	4720–6857	Рысь
12.06.01	23:50	6000	4546–7880	PFES
14.04.03	23:14	16200	5275–6760	NES
15.08.03	21:26	10800	5275–6760	NES
20.08.03	23:54	9600	4519–5997	NES
19.09.05	16:29	12000	5275–6760	NES
13.11.05	16:29	10800	4558–6010	NES
14.11.05	16:40	10800	5275–6760	NES
01.09.06	20:41	2400	5275–6760	NES

параметров, металличности и химического состава, уточнение эволюционного статуса. В разделе 2 кратко описаны методы наблюдений и редукции данных, в разделе 3 мы приводим и анализируем полученные результаты и в разделе 4 — кратко суммируем основные выводы.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наши наблюдения V2324 Cyg выполнены на 6-метровом телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН. Первый спектр получен в 1995 г. с эшелле-спектрографом Рысь [18] в фокусе Нэсмита со спектральным разрешением  $R=25000$ . В сочетании с ПЗС-матрицей  $1K \times 1K$  элементов была зарегистрирована спектральная область  $\lambda\lambda 4720 - 6860\text{ \AA}$ . Вторым спектром получен с эшелле-спектрографом первичного фокуса PFES [19] ( $R=15000$ ). В сочетании с ПЗС-матрицей  $1K \times 1K$  элементов была зарегистрирована спектральная область  $\lambda\lambda 4680-8590\text{ \AA}$ . Все последующие наблюдения звезды выполнялись в фокусе Нэсмита БТА с эшелльным спектрографом NES [20], обеспечивающим спектральное разрешение  $R=60000$ . Наблюдения были выполнены с использованием крупноформатной ПЗС-матрицы  $2048 \times 2048$  элементов и с резателем изображений [20]. В табл. 1 для каждого спектра указаны: дата, средний момент наблюдений UT, продолжительность накопления, зарегистрированная область длин волн и использованный спектрограф.

Экстракция данных из двумерных эшелле-спектров выполнена с помощью модифицированного [21] контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS. Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух

спектров, полученных последовательно один за другим. Калибровка по длинам волн осуществлялась с использованием спектров Th-Ag-лампы с полым катодом. Дальнейшая обработка, включающая спектрофотометрические и позиционные измерения, выполнена с помощью программы DECH20 [22]. Контроль и коррекция инструментальных сдвигов спектров звезды и лампы осуществлялись по теллурическим линиям молекул  $O_2$  и  $H_2O$ .

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1. Особенности оптического спектра V2324 Cyg

Основная часть нашего спектрального материала, данные о котором собраны в табл. 1, получена с предельным спектральным разрешением  $R \approx 0.1 \text{ \AA}$ . Уже предварительный просмотр спектров высокого разрешения показал, что V2324 Cyg — звезда спектрального класса F с широкими абсорбциями и профилями типа P Cyg у некоторых линий (в зарегистрированном спектральном диапазоне это  $H\alpha$ ,  $H\beta$ , D1 и D2 NaI). Помимо ожидаемых эмиссий в  $H\alpha$  и в линиях дублета NaD, мы обнаружили еще одну peculiarity спектра — линии поглощения имеют большую ширину, что нетипично для звезды со статусом post-AGB.

*Спектральный класс.* Косвенная оценка спектрального класса, B8–A2 Ib–II, сделана Архиповой и Иконниковой [10] по данным своих фотометрических наблюдений. Перейра и Миранда [17] по спектру низкого разрешения дают более поздний спектральный класс, но указывают столь же высокую светимость. Звезду HD 842 (сверхгигант A9I) из атласа [23] они выбрали как наиболее близкую по спектру V2324 Cyg. Однако классификация V2324 Cyg в работе [17] не вполне удовлетворительная по двум причинам:

- Приводимый в работе [17] спектр V2324 Cyg очень похож также и на другой спектр из атласа [23], принадлежащий HD 64191 F0–3 III (переменная типа  $\delta$  Sct AD CMi). По соотношению глубин G-полосы и  $H\gamma$  можно было бы отнести V2324 Cyg даже к классу F5, однако, как показано ниже, профили бальмеровских линий в ее спектре аномальны.
- На результат классификации могут повлиять ширины абсорбций [24], а они сильно различаются у V2324 Cyg и звезд сравнения. Скорости вращения  $V \sin i$  для V2324 Cyg, HD 842 и HD 64191 соответственно: 69 км/с (по нашим спектрам), 16 км/с (также наша оценка, но по спектру в библиотеках ELODIE.3 [25], и ELODIE.3.1 [26]) и 12 км/с [27].

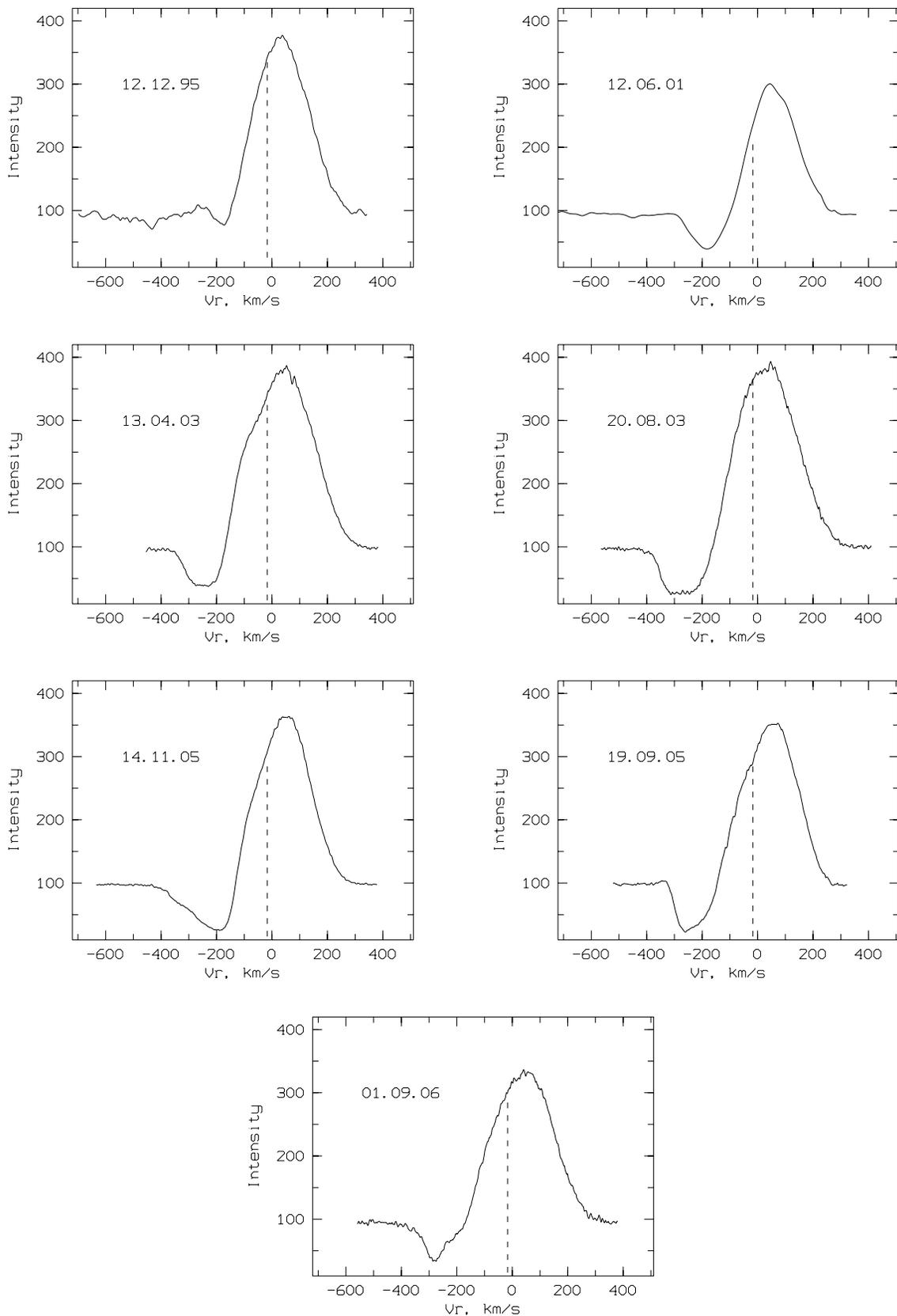
Наш материал позволил провести спектральную классификацию по отношениям интенсивностей линий нейтральных атомов и ионов металлов. Использованы прежде всего многочисленные абсорбции FeI и отдельные абсорбции FeII. Калибровочные кривые построены по данным атласа Ключковой и др. [28] и библиотеки спектров ELODIE.3 [25]. Последняя работа особенно удобна тем, что из нее можно было отобрать спектры с линиями примерно той же ширины, что и у V2324 Cyg, непосредственно сопоставлять их фрагменты и профили отдельных линий и бленд, сравнивать не эквивалентные ширины, а глубины линий.

Отношения глубин абсорбций в парах линий FeII/FeI в пределах спектрального класса F уменьшаются от F0 к F8, причем у сверхгигантов они больше и снижаются гораздо резче, чем у звезд главной последовательности. У V2324 Cyg эти отношения соответствуют интервалу от A9–F0 V до F8–G0 I. Вариант сверхгиганта должен быть отброшен, т. к. при нужном отношении глубин сами глубины оказываются слишком большими.

Наши спектры V2324 Cyg хорошо воспроизводятся спектрами из библиотеки ELODIE.3 [25] для звезд со скоростями вращения от 60 до 80 км/с: HD 58923 (F0 III), HD 47072 (F0 II), HD 432 (F2 III(IV)), HD 219877 (F3 IV). Это звезды с надежными параллаксами (от 9 до 60 mas по каталогу HIPPARCOS), и прямые оценки абсолютных величин дают:  $0.2 < M_v < 2.8^m$ . Для трех из них эти оценки соответствуют классам МК. Исключение составляет HD 47072, для нее параллакс указывает на класс светимости III–IV.

Сопоставление центральных глубин абсорбций  $R_o$ , усредненных по спектрам указанных звезд сравнения, с усредненными глубинами по нашим спектрам V2324 Cyg показало, что, если исключить отдельные, наиболее сильные линии, эти усредненные величины  $R_o$  в пределах ошибок совпадают как для FeI, так и для FeII. Таким образом, можно считать, что V2324 Cyg — это гигант либо субгигант раннего подкласса F. Более точно спектральный класс оценивался по зависимостям отношений  $R_o(\text{FeII})/R_o(\text{FeI})$  от Sp, полученным для звезд классов светимости III и IV. Так, например, при переходе от F0 III к F5 III для пары близких линий FeII(43)  $\lambda$  4732 и FeI(554)  $\lambda$  4737 отношение глубин убывает от 1.3 до 0.9, а для бленды FeII(40)  $\lambda$  6433, FeI(62)  $\lambda$  6431 — от 1.6 до 0.7. Величины этих отношений для V2324 Cyg: 1.05 и 0.98 соответственно. В итоге по линиям металлов умеренной интенсивности оцениваем спектральный класс V2324 Cyg: F2 III.

*Спектральные аномалии.* Некоторые детали спектра резко отличают V2324 Cyg от обычного гиганта раннего подкласса F. Это прежде всего



**Рис. 1.** Переменность профиля  $H\alpha$  в спектрах V2324 Cyg. Штриховой линией нанесено среднее значение скорости по фотосферным линиям металлов. Здесь и на последующих рисунках уровень континуума принят за 100.

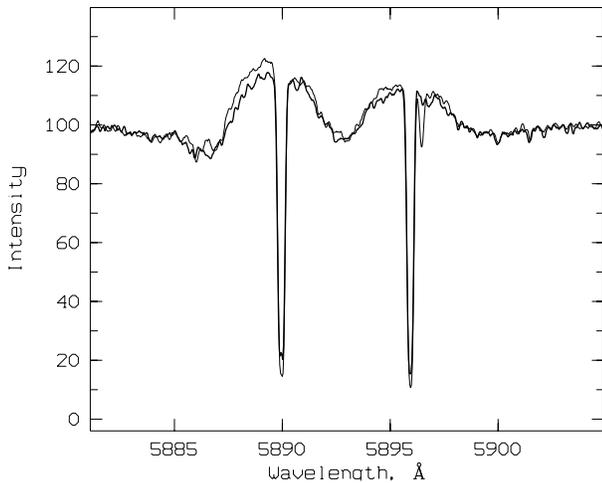


Рис. 2. Профиль D-линий NaI в двух спектрах V2324 Cyg, полученных в 2005 г.

эмиссии в ряде линий. В доступной нам спектральной области они непосредственно видны в  $H\alpha$  (см. рис. 1) и дублете NaI(1) в виде красносмещенных компонентов их P Cyg-профилей (см. рис. 2). Вершины эмиссий в линиях NaI прорезаны межзвездными абсорбциями, но как нижний предел остаточной интенсивности для D2 можно принять значение  $\tau \approx 1.25$  (рис. 2). Как следует из рис. 1, пик эмиссии  $H\alpha$  на наших спектрах не менее, чем в 3 раза (а на двух из них почти в 4 раза) выше уровня континуума. Сопоставление профилей  $H\alpha$  в спектрах, полученных в разные моменты времени, указывает на их переменность: меняется форма и интенсивность эмиссии и глубина абсорбционного компонента. Положение эмиссионного пика и абсорбции также меняется.

Профиль линии  $H\beta$  также содержит слабый эмиссионный компонент, интенсивность и положение которого, как следует из рис. 3, меняются со временем. Присутствие эмиссии проявляется в асимметрии профиля. Если разделить профиль надвое вертикальной прямой  $V_r = 0$ , то красная его часть оказывается приподнятой, а синяя, напротив, углубленной. На  $V_r \approx 100$  км/с глубина профиля  $R \approx 0.1 - 0.2$ , а 20.08.03 он даже выходит на уровень континуума. В то же время синесмещенное ядро абсорбции на  $V_r \approx -(100 - 200)$  км/с глубже, чем у любой из названных выше звезд сравнения (12.06.01  $R_0 \approx 0.85$ ).

Бленда OI(1)  $\lambda 7774$  в спектре низкого разрешения [17] видна как эмиссия, не уступающая в интенсивности дублету NaI(1). В единственном из наших спектров, полученном 12.06.01, бленда OI(1)  $\lambda 7774$ , по-видимому, также частично залита эмиссией: эквивалентная ширина бленды

$W \approx 0.4 \text{ \AA}$ , что соответствует по [29] классу светимости V для ранних подклассов F и вдвое меньше, чем у типичной звезды F2 III.

Кроме того, как отмечено выше, при сопоставлении глубин абсорбций металлов в спектрах V2324 Cyg и звезд сравнения мы отбрасывали самые сильные линии — прежде всего триплеты FeII(42) и MgI(2). Средние центральные глубины для звезд сравнения:  $R_0 \approx 0.3$ , а для V2324 Cyg:  $R_0(\text{FeII}) \approx 0.12$  и  $R_0(\text{MgI}) \approx 0.16$ . Почти все эти линии входят в тесные бленды и в спектрах обычных звезд доминируют в этих блендах, но в спектре V2324 Cyg они ослаблены до уровня других вкладчиков (в основном FeI). Можно и это ослабление приписать присутствию эмиссий, но тогда остается неясным, почему оно не приводит также к заметным синим сдвигам абсорбций FeII(42) и MgI(2) относительно линий металлов малой и умеренной интенсивности (как и в случае триплетта OI(1) и в отличие от  $H\beta$ ).

### 3.2. Лучевые скорости

Обсуждаемые ниже скорости измерены только по минимально блендированным линиям. В табл. 2 для них приведены основные, а иногда и побочные компоненты, использованные лабораторные длины волн, центральные остаточные интенсивности  $\tau$  и гелиоцентрические лучевые скорости  $V_r$ .

Для отобранных абсорбций малой и средней интенсивности (фотосферных) мы не выявили существенных систематических изменений глубин и скоростей от даты к дате. Не исключены малоамплитудные (на уровне 1–2 км/с) изменения скорости, но поскольку они могут быть следствием как пульсаций или двойственности, так и неучтенных систематических ошибок измерения, для фотосферных абсорбций в табл. 2 приводятся значения  $V_r$ , усредненные по всему наблюдательному материалу. В этой же таблице для линий  $H\beta$ , NaI(1) и  $H\alpha$ , показавших переменность профилей, значения  $\tau$  и  $V_r$  даны для каждой из дат наблюдений. Для двух последних линий значок “/” разделяет значения, относящиеся к абсорбционной и эмиссионной составляющим их P Cyg-профилей.

Глубины отобранных фотосферных абсорбций в табл. 2 заключены в интервале  $0.20 < R_0 < 0.03$ . Систематический ход лучевой скорости  $V_r$  с глубиной линий  $R_0$  не заметен, что дает нам основание определить среднюю скорость  $V_r = -16.8 \pm 0.6$  км/с. Вероятно, она близка к скорости центра массы звезды  $V_{\text{sys}}$ . Надежного определения системной скорости  $V_{\text{sys}}$  для V2324 Cyg нет, так как излучение в полосах молекулы CO [30] и мазера  $\text{H}_2\text{O}$  [31] не обнаружено.

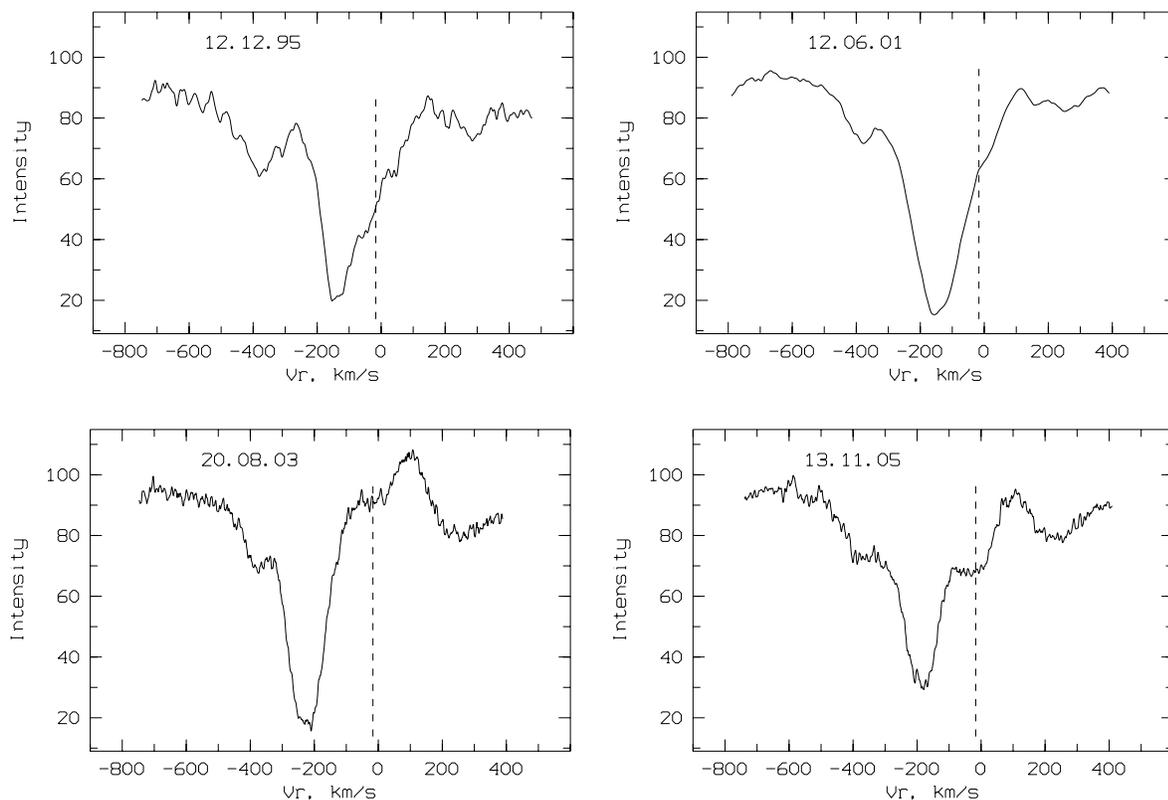


Рис. 3. Переменность профиля  $H\beta$  в спектрах V2324 Cyg. Штриховой линией нанесено среднее значение скорости по фотосферным линиям металлов.

Что же касается скоростей, найденных по ядрам абсорбционных компонентов ветровых линий, то они изменяются со временем. Как видно из табл. 2, в спектрах, содержащих  $H\beta$  и  $NaI D2$ , скорости по ядрам абсорбций оказываются близкими для этих двух линий и колеблются от  $-140$  до  $-225$  км/с (а скорости расширения соответствующих слоев — примерно от  $120$  до  $210$  км/с). Лучевые скорости по ядрам  $H\alpha$  ниже: от  $-180$  до  $-280$  км/с. Наибольшую (в зарегистрированной нами области спектра) скорость расширения дают ее оценки по синим границам абсорбций  $H\alpha$ : 12.12.95 для синего компонента расщепленной абсорбции она достигает  $450$  км/с.

### 3.3. Параметры и химический состав атмосферы

Определение фундаментальных параметров по спектральным данным и расчет содержаний химических элементов в случае V2324 Cyg осложнены большой шириной абсорбций в спектре звезды из-за большой скорости вращения  $V \sin i = 69$  км/с. Ниже покажем, что ошибки измерения эквивалентных ширин вносят основной вклад в неопределенность химического состава.

Для определения параметров модели атмосферы звезды — эффективной температуры и ускорения силы тяжести, для расчетов химического состава и синтетических спектров использована сетка моделей звездных атмосфер, рассчитанных [32] в гидростатическом и ЛТР-приближении для различных значений металличности. Известно, что самым сложным моментом в задаче расчета химического состава звезды всегда является фиксация основных параметров — эффективной температуры  $T_{eff}$  и ускорения силы тяжести  $\log g$ . Для объектов с неясным эволюционным статусом, а следовательно, и с неопределенным покраснением, затруднительно применять фотометрические данные для определения эффективной температуры. К тому же профили бальмеровских линий нейтрального водорода в спектре V2324 Cyg искажены переменной эмиссией. Поэтому эффективную температуру звезды мы определили из условия независимости содержания нейтрального железа от потенциала возбуждения соответствующих линий, ускорение силы тяжести выбиралось из условия ионизационного баланса для атомов и ионов железа, величина микротурбулентной скорости  $\xi_t$  — из условия независимости содержания железа от интенсивности линий.

**Таблица 2.** Остаточные интенсивности  $r$  и гелиоцентрические лучевые скорости  $V_r$  для отобранных линий в спектре V2324Cyg. Двоеточием выделены неуверенные величины

Линия	$\lambda$ , Å	$r$	$V_r$ , км/с	Дата
1	2	3	4	5
FeII(38)	4576.34	0.86	–15	
FeII(38)	4583.84	0.83:	–18	
CaI(23)	4585.87	0.88	–15	
CrII(44)	4588.20	0.89	–20	
TiII(50)	4589.95	0.88	–16	
FeI(39)	4602.94	0.90	–	
FeI(554)	4607.65	0.92:	–	
FeI(554)	4613.28:	0.88	–	
CrI(21)				
FeII(37)	4629.33	0.85	–15:	
FeI(115)				
CrII(44)	4634.07	0.89	–15	
FeI(820)	4643.47	0.94	–	
FeI(38)	4654.56:	0.87	–18:	
FeI(554)				
FeII(25)				
ScII(24)	4670.30:	0.86	–	
FeI(821)	4678.85	0.87	–	
MgI(11)	4702.99	0.82	–15	
NiI(98)	4714.42	0.87	–17	
FeII(43)	4731.47	0.86	–	
FeI(38)	4733.60	0.92	–	
FeI(554)	4736.78	0.86	–16	
TiII(92)	4778.99	0.85	–18	
MnI(16)	4783.42	0.87	–16	
TiII(92)	4805.09	0.88	–17:	
ZnI(2)	4810.54	0.95:	–16:	
MnI(16)	4823.52	0.79	–	
CrII(30)	4824.14			
NiI(131)	4829.03	0.93:	–	
CrI(31)	4829.37			

**Таблица 2.** (Продолжение)

Линия	$\lambda$ , Å	$r$	$V_r$ , км/с	Дата
1	2	3	4	5
CrII(30)	4836.23	0.90	–	
CrII(30)	4848.25	0.84	–	
H $\beta$	4861.33	0.20:	–138:	12.12.95
		0.15	–145	12.06.01
		0.19	–226	20.08.03
		0.30	–182	13.11.05
FeI(318)	4871.70:	0.74	–	
FeI(318)	4891.10:	0.75	–	
BaII(3)				
YII(22)	4900.10:	0.86	–18:	
FeI(318)	4903.31	0.87	–	
FeI(318)	4918.90:	0.81	–	
FeI(318)	4920.50	0.80	–16	
FeII(42)	4923.92	0.88	–	
FeI(114)	4924.77			
FeI(1065)				
BaII(1)	4934.00:	0.78	–	
FeI(687)	4950.11	0.94	–20:	
FeI(318)	4957.50:	0.73	–	
FeI(687)	4966.09	0.91	–20:	
FeI(984)	4973.11	0.95	–16:	
FeI(1066)	4988.98:	0.94:	–	
NiI(111)	5017.58			
FeII(42)	5018.40:	0.85	–	
NiI(38)	5020.03	0.90:	–	
ScII(23)	5031.02	0.89	–15	
FeI(383)	5068.80:	0.88	–	
FeI(1094)	5074.75	0.88	–16	
YII(20)	5087.42	0.90	–15	
FeI(1090)	5090.78	0.93	–18	
FeI(16)	5107.55:	0.87	–	
FeI(36)				

Таблица 2. (Продолжение)

Линия	$\lambda$ , Å	$r$	$V_r$ , км/с	Дата
1	2	3	4	5
NiI(177)	5115.40	0.94:	–	
TiII(86)	5129.16:	0.87	–17:	
FeI(1092)	5133.69	0.88	–20	
FeI(383)	5139.37:	0.82	–17:	
TiII(70)	5154.07:	0.86:	–	
FeI(1089)	5162.27	0.89	–21:	
FeI(1)	5166.28			
MgI(2)	5167.32:	0.83:	–	
FeI(37)	5167.49			
FeI(1)	5168.90			
FeII(42)	5169.03	0.89	–25:	
MgI(2)	5172.68	0.85	–25:	
MgI(2)	5183.61	0.83	–13	
TiII(86)	5185.91	0.90	–18	
TiII(70)	5188.69	0.83	–18:	
CaI(49)	5188.84			
FeII(49)	5197.58	0.87	–20:	
FeI(66)	5198.72			
FeI(66)	5202.34	0.91	–17	
CrI(7)	5208.44	0.84	–	
FeI(553)	5208.60			
FeI(553)	5229.85	0.91	–19	
CrII(43)	5232.50			
FeI(383)	5232.94	0.85	–	
CrII(43)	5237.32	0.89	–19	
ScII(26)	5239.82	0.93	–17	
FeI(1)	5247.06			
CrI(18)	5247.57	0.93:	–	
FeI(1)	5250.22			
FeI(66)	5250.65	0.91:	–	
FeI(553)	5273.28:	0.88:	–	
FeI(114)				

Таблица 2. (Продолжение)

Линия	$\lambda$ , Å	$r$	$V_r$ , км/с	Дата
1	2	3	4	5
FeI(383)	5281.79	0.89	–	
FeI(929)	5288.53	0.96:	–19:	
FeI(553)	5302.31	0.91	–18	
CrII(43)	5310.69	0.96	–15:	
CrII(43)	5313.58	0.94	–17	
FeII(49)	5316.66:	0.87	–16:	
FeII(48)				
FeI(553)	5324.18	0.87	–	
CrI(18)	5345.80	0.93:	–	
CrII(24)	5346.08			
FeII(48)	5362.86	0.90	–18	
FeI(1146)	5364.87	0.89:	–	
FeI(786)	5365.40			
FeI(1146)	5367.47	0.90	–16	
FeI(1146)	5383.37	0.89	–17	
FeI(553)	5393.17	0.91	–18	
FeI(15)	5397.13	0.89	–16:	
FeI(1145)	5398.29			
FeI(1145)	5400.51:	0.93:	–	
FeII(48)	5414.07			
FeI(1165)	5415.20	0.89	–	
TiII(69)	5418.77	0.92	–16	
FeI(1146)	5424.07	0.86	–	
FeII(49)	5425.25			
FeI(15)	5429.70	0.86	–16	
FeI(15)	5434.52	0.89	–16	
TiI(3)	5446.59			
FeI(15)	5446.92:	0.83:	–17:	
FeI(1145)				
FeI(15)	5455.56:	0.83	–17:	
FeI(15)	5497.52	0.91	–17	
FeI(15)	5506.79	0.91	–	

Таблица 2. (Продолжение)

Линия	$\lambda$ , Å	$r$	$V_r$ , км/с	Дата
1	2	3	4	5
DIB	5512.64	0.92	—	
CaI(48)	5512.99			
ScII(31)	5526.81	0.91:	—	
MgI(9)	5528.41	0.87	—	
FeII(55)	5534.84	0.87:	—	
FeI(626)	5535.42			
FeI(1183)	5554.90	0.94	—	
FeI(1183)	5565.71	0.95	–15	
FeI(686)	5569.62	0.93	–15	
FeI(686)	5572.86:	0.90	–16:	
FeI(686)	5576.10	0.94	–18:	
CaI(21)	5581.98	0.93	–17	
CaI(21)	5594.48:	0.88	–18:	
FeI(1182)	5594.66			
CaI(21)	5601.28	0.92:	—	
CaI(21)				
FeI(686)	5602.90:	0.88	—	
FeI(209)	5615.31			
FeI(686)	5615.60:	0.86	–17:	
FeI(1314)	5633.95	0.96:	–15:	
FeI(1183)	5679.03	0.96	–18	
NaI(6)	5688.21	0.93:	—	
NiI(231)	5715.09	0.97:	—	
FeI(1107)	5717.84	0.97:	–16:	
FeI(1087)	5731.77	0.95:	–15:	
FeI(1107)	5763.00:	0.92:	–17:	
SiI(17)	5772.15	0.96	–16	
FeI(1087)	5775.08	0.98:	—	
DIB	5780.37	0.90	–7:	
DIB	5796.96	0.87	–8	
FeI(1179)	5816.38	0.95:	–16:	
DIB	5849.80	0.96	–8	

Таблица 2. (Продолжение)

Линия	$\lambda$ , Å	$r$	$V_r$ , км/с	Дата
1	2	3	4	5
BaII(2)	5853.68	0.92	–16	
CaI(47)	5857.45	0.91	—	
NiI(228)	5857.75			
FeI(1181)	5859.59	0.95:	—	
FeI(1180)	5862.36	0.95	–15:	
NaI(1)	5889.95	0.82/1.17	–140/2:	12.12.95
		0.90/1.10	–160/–8:	12.06.01
		0.90/1.22	–220/–21:	14.04.03
		0.96/1.23	–207/–18:	15.08.03
		0.84/1.20	–210/–22:	20.08.03
		0.81/1.24	–181/–25:	19.09.05
		0.90/1.20	–188/–26	14.11.05
		0.90/1.20	–200/–16:	1.09.06
NaI(1)I.S.		0.07	–13	
NaI(1)	5895.92	0.88/1.09	–137/–2:	12.12.95
		0.93/1.08	–150/–15:	12.06.01
		1.02/1.19	–169/–20:	14.04.03
		1.05/1.18	–172/–37:	15.08.03
		0.98/1.16:	–180/–37:	20.08.03
		0.90/1.17	–164/–20:	19.09.05
		0.94/1.12	–168/–18	14.11.05
		0.95/1.12	–150/–37:	1.09.06
NaI(1)I.S.		0.07	–13	
FeI(1180)	5914.17:	0.94:	–16:	
FeI(1181)				
FeI(1260)	5987.07	0.96:	—	
FeII(46)	5991.37	0.95	–17:	
FeI(959)	6003.02	0.97:	–15:	
MnI(27)	6016.64	0.97	–15:	
FeI(1178)	6024.07	0.95	–14:	
FeI	6042.10	0.96	–17:	
FeI(1259)	6056.01	0.96	–16:	

Таблица 2. (Продолжение)

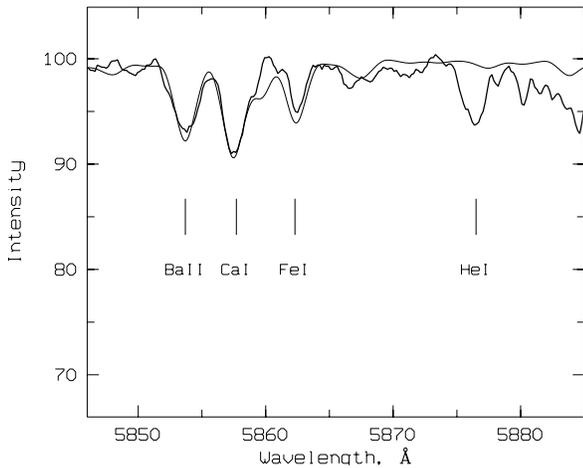
Линия	$\lambda$ , Å	$r$	$V_r$ , км/с	Дата
1	2	3	4	5
FeI(207)	6065.49	0.93	-17:	
FeII(46)	6084.10	0.97:	-	
FeI(1259)	6102.18			
CaI(3)	6102.73:	0.87	-16:	
FeI(1260)	6103.19			
CaI(3)	6122.22	0.89	-17	
FeI(169)	6136.62			
FeI(62)	6137.00	0.87:	-	
FeI(207)	6137.70			
BaII(2)	6141.72	0.86	-17	
FeII(74)	6147.74	0.93	-	
FeII(74)	6149.25			
CaI(20)	6161.29			
CaI(3)	6162.18:	0.89	-18:	
DIB	6195.96	0.94	-11	
FeI(207)	6200.32	0.97	-	
DIB	6203.08	0.96	-12:	
FeI(207)	6230.73	0.92	-17	
FeI(62)	6265.14	0.96:	-	
SiII(2)	6347.10	0.90	-14:	
SiII(2)	6371.36	0.93	-	
DIB	6379.29	0.91	-12	
FeI(168)	6393.61	0.93	-16	
FeI(816)	6400.01:	0.91	-17:	
FeI(13)	6400.32			
FeI(816)	6411.66	0.95	-16:	
CaI(18)	6439.08	0.89	-17	
CaI(19)	6449.82	0.92	-18:	
CaI(19)	6455.60			
FeII(74)	6456.39:	0.88	-16:	
CaI(18)	6462.61:	0.90	-16:	
FeI(168)	6462.73			

Таблица 2. (Продолжение)

Линия	$\lambda$ , Å	$r$	$V_r$ , км/с	Дата
1	2	3	4	5
FeI(268)	6546.25	0.91	-15	
H $\alpha$	6562.81	0.77/3.70:	-180/31	12.12.95
		0.40/3.00:	-183/47	12.06.01
		0.40/3.90	-247/45	14.04.03
		0.29/3.90	-278/30	15.08.03
		0.24/3.60	-260/42	19.09.05
		0.25/3.60	-195/51	14.11.05
		0.35/3.30	-280/40	1.09.06
DIB	6613.56	0.87	-12:	
NiI(43)	6643.64	0.96	-13:	
DIB	6660.64	0.95:	-10:	
FeI(268)	6678.00	0.94	-14:	
LiI(1)	6707.80:	0.95	-15:	
CaI(32)	6717.69	0.94	-17	
CaI(30)	7148.16	0.89:	-	
FeI(1077)	7495.08	0.93	-15:	
FeI(1077)	7511.03	0.94	-	
NiI(187)	7555.61	0.95	-	
FeI(1077)	7568.91	0.94	-	
FeI(1306)	7742.72	0.94	-	
OI(1)	7771.94	0.96:	-16:	
OI(1)	7774.17	0.90:	-	
OI(1)	7775.39			
FeI(1154)	7780.57	0.93	-15:	
FeI(1154)	7832.21	0.93:	-	

Из-за вероятного искажения профилей линий металлов эмиссией мы отбирали для этих процедур те линии, для которых такие искажения визуально малы или отсутствуют.

Критерием достоверности метода является отсутствие зависимости содержания от потенциала возбуждения соответствующих линий для других химических элементов, представленных в спектрах многочисленными линиями (ScII, TiII, CrII). Кроме того, при надежном определении микротурбулентной скорости отсутствует зависимость инди-

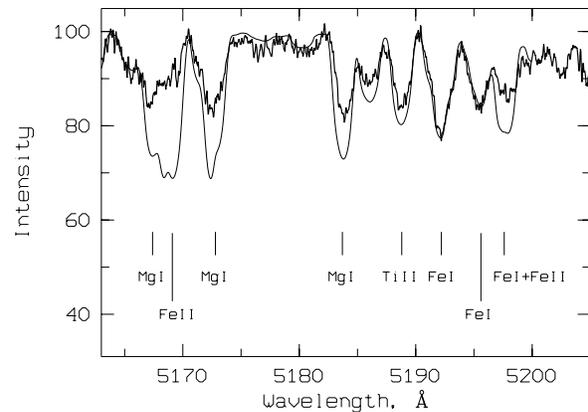


**Рис. 4.** Линии бария BaII  $\lambda$  5853 и гелия HeI  $\lambda$  5876 в спектре V2324 Cyg, полученном в 2001 г. Тонкой линией нанесен теоретический спектр, рассчитанный с  $T_{eff}=7500$  K,  $\log g = 2.0$ ,  $\xi_t = 6.0$  км/с и солнечным содержанием химических элементов.

видуальных содержаний от эквивалентных ширин линий, использованных для расчета. Типичная точность определения параметров модели (в среднем) для звезды с эффективной температурой около 7500 K составляет  $\Delta T_{eff} \approx 200$  K,  $\Delta \log g \approx 0.5 dex$ ,  $\Delta \xi_t \approx 1.0$  км/с. В табл. 3 приведены ошибки содержаний химических элементов, обусловленные указанными ошибками параметров. Из сопоставления ошибок в табл. 3 и 4 следует, что основной вклад в неопределенность большего числа элементов дают ошибки измерения эквивалентных ширин линий.

Стандартной проверкой самосогласованности полученных параметров является хорошее согласие наблюдаемого и синтетического спектров. Мы сравнили наблюдаемый спектр объекта с синтетическим, рассчитанным нами с помощью программы [32]. Для расчета взята модель атмосферы с солнечным химическим составом и параметрами:  $T_{eff} = 7500$  K,  $\log g = 2.0$ ,  $\xi_t = 6.0$  км/с. Сопоставление наблюдаемого и теоретического спектров (см. примеры на рис. 4 и 5) указывает на их удовлетворительное согласие, если исключить линии HeI, а также уже отмеченные выше линии FeII(42) и MgI(2), искаженные эмиссией.

Величины сил осцилляторов  $\log gf$  и иные атомные константы, необходимые для расчета содержаний, мы заимствовали из базы данных VALD [33, 34]. В табл. 4 даны принятые параметры модели атмосферы  $T_{eff} = 7500$  K,  $\log g = 2.0$ ,  $\xi_t = 6.0$  км/с и средние содержания элементов по отношению к железу  $[X/Fe]$ . Химический состав фотосферы Солнца, относительно которого мы рассматриваем содержания химических элементов исследуемой



**Рис. 5.** Линии триплета магния MgI  $\lambda$  5167–5183 и железа FeII  $\lambda$  5169 в спектре V2324 Cyg, полученном 13.11.05. Тонкой линией нанесен теоретический спектр, рассчитанный с  $T_{eff}=7500$  K,  $\log g = 2.0$ ,  $\xi_t = 6.0$  км/с и с солнечным содержанием химических элементов.

звезды, взят из работы [35]. Все расчеты химического состава выполнены нами с помощью программ, разработанных Шуляком и др. [32] и адаптированных ими же для PC в среде OS Linux. Расчет плоскопараллельных моделей в приближении ЛТР выполнен с помощью программ, описанных в работе [32]. Поправки за сверхтонкую структуру и изотопические сдвиги, расширяющие линии NiI и BaII, не вводились.

Разброс содержаний химических элементов, полученных по набору линий, невелик: среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  не превышает 0.3 dex (см. табл. 4). При определении параметров модели атмосферы мы использовали линии малой и умеренной интенсивности с эквивалентными ширинами  $W \leq 0.25 \text{ \AA}$ , поскольку приближение стационарной плоскопараллельной атмосферы может быть неадекватным при описании наиболее сильных спектральных деталей. Кроме того, часть сильных абсорбций в спектре искажена влиянием околосредной оболочки. При недостаточном спектральном разрешении интенсивность оболочечных компонент включается в интенсивность компонент, формирующихся в атмосфере. Расчет содержаний химических элементов выполнен для расширенного набора линий — для ряда элементов (SiII, TiII, FeI, FeII, BaII) мы привлекли линии с эквивалентными ширинами, превышающими вышеуказанный предел эквивалентной ширины. Рассмотрим детальнее содержание элементов, комбинируя в группы по типу их синтеза.

*Легкие элементы.* Как и следовало ожидать в случае проэволюционировавшей звезды, содержание ряда легких элементов изменено. Прежде всего обращает на себя внимание избыток лития, рассчитанный по линии нейтрального лития  $\lambda 6707 \text{ \AA}$ . Эк-

**Таблица 3.** Ошибки расчета содержания химических элементов в атмосфере V2324 Cyg  $\Delta \log \varepsilon(X)$ , обусловленные неточностью определения параметров атмосферы звезды

X	$\Delta T_{eff}$ +200 K	$\Delta \log g$ +0.5	$\Delta \xi_t$ -1.0 km/s
HeI	-0.57	-0.04	+0.08
LiI	+0.07	-0.06	+0.02
Cl	-0.02	+0.03	+0.05
OI	-0.10	+0.09	+0.01
NaI	+0.02	-0.07	+0.04
MgI	-0.12	-0.24	+0.27
SiI	-0.14	+0.09	+0.07
SI	+0.02	-0.02	+0.03
CaI	-0.04	+0.07	+0.02
ScII	-0.03	+0.13	+0.04
TiII	+0.00	+0.14	+0.09
CrI	+0.06	-0.05	+0.09
CrII	-0.01	+0.13	+0.04
FeI	+0.03	-0.05	+0.14
FeII	-0.02	+0.14	+0.13
NiI	+0.04	-0.06	+0.05
ZnI	+0.06	-0.04	+0.04
YII	+0.03	+0.27	+0.07
BaII	+0.06	+0.04	+0.29

вивалентная ширина этой линии измеряется уверенно во всех наших спектрах V2324 Cyg, ее средняя эквивалентная ширина  $W \geq 50 \text{ m}\text{\AA}$ . Поэтому факт обнаружения избытка лития  $[\text{LiI}/\text{Fe}] \geq +0.68$  считаем надежным. На рис. 6 представлено сопоставление наблюдаемого и синтетического спектров звезды в области линии LiI 6707 Å. Расчет выполнен с параметрами  $T_{eff} = 7500 \text{ K}$ ,  $\log g = 2.0$ ,  $\xi_t = 6.0 \text{ km/s}$  и содержанием элементов из табл. 4. Эта аномалия является самой интересной в картине распространенности химических элементов в атмосфере V2324 Cyg.

Выявлен незначительный дефицит кислорода  $[\text{O}/\text{Fe}] = -0.12$  при небольшом избытке углерода  $[\text{C}/\text{Fe}] = +0.35$ , при этом отношении  $\text{C}/\text{O} > 1$ . К сожалению, использованные линии кислорода OI  $\lambda 5330.7, 6155.9, 6158.1 \text{ \AA}$  очень слабы, к тому же из-за большой ширины их эквивалент-

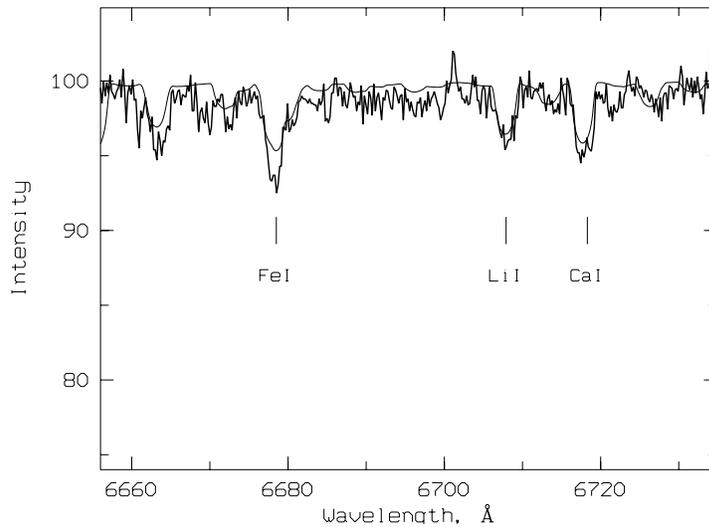
**Таблица 4.** Содержания химических элементов  $\varepsilon(X)$  в атмосфере V2324 Cyg. Здесь  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение содержания,  $n$  — число использованных в расчете линий. Расчет выполнен с параметрами модели  $T_{eff} = 7500 \text{ K}$ ,  $\log g = 2.0$ ,  $\xi_t = 6.0 \text{ km/s}$ . Содержания химических элементов  $\varepsilon(X)$  в атмосфере Солнца взяты из работы [35]

Солнце		V2324 Cyg			
X	$\varepsilon(X)$	$\varepsilon(X)$	$\sigma$	$n$	$[\text{X}/\text{Fe}]$
LiI	3.25 <sup>1</sup>	$\geq 3.93$		1	$\geq +0.68$
Cl	8.39	8.73	0.08	9	+0.35
OI	8.66	8.53	0.28	3	-0.12
NaI	6.17	7.20	0.22	3	+1.04
MgI	7.53	7.96	0.04	2	+0.43
SiII	7.51	7.22	0.09	5	-0.28
SI	7.11	7.41	0.19	2	+0.31
CaII	6.31	6.85	0.13	4	+0.55
ScII	3.05	3.05	0.15	8	+0.01
TiII	4.90	4.76	0.08	11	-0.13
CrI	5.64	5.39	0.10	5	-0.24
CrII		5.31	0.06	19	-0.32
FeI	7.45	7.44	0.07	28	+0.00
FeII		7.43	0.10	14	-0.01
NiI	6.23	6.23	0.10	8	+0.01
ZnI	4.60	4.68	0.17	2	+0.09
YII	2.21	2.18	0.27	2	-0.02
BaII	2.17	2.64	0.09	4	+0.46

Примечание: 1 — значение для метеоритов [35].

ные ширины измерены с большой ошибкой (в табл. 4 для кислорода среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 0.28$ ). Поэтому содержание кислорода определено ненадежно. Линии азота в зарегистрированном интервале длин волн нам не были доступны, а его содержание принципиально важно для определения стадии эволюции. В целом, относительно триады CNO можем уверенно говорить лишь об избытке углерода.

Содержание натрия определено по линиям NaI  $\lambda 5682, 5688, 6160 \text{ \AA}$  умеренной интенсивности, для которых невелики поправки, вызванные отклонением от локального термодинамического равновесия [36, 37]. Поэтому выявленный избыток натрия  $[\text{Na}/\text{Fe}] = +1.04$  в основном может быть продуктом синтеза натрия в NeNa-цикле, который идет од-



**Рис. 6.** Линия Li I  $\lambda 6707 \text{ \AA}$  в спектре V2324 Cyg, полученном 12.06.01. Тонкой линией нанесен теоретический спектр, рассчитанный с  $T_{eff} = 7500 \text{ K}$ ,  $\log g = 2.0$ ,  $\xi_t = 6.0 \text{ км/с}$  и содержанием элементов из табл. 4.

новременно с горением водорода в CNO-цикле. Содержание магния, которое определено по двум линиям, Mg I  $\lambda 4702.99$  и  $5528.40 \text{ \AA}$ , также повышено:  $[\text{Mg}/\text{Fe}] = +0.43$ . Отношение  $[\text{Na}/\text{Mg}] = +0.61$ .

*Элементы железного пика.* Содержание железа, рассматриваемое обычно в качестве металличности, в атмосфере V2324 Cyg не отличается от солнечного:  $\log \varepsilon(\text{Fe I}, \text{Fe II}) = 7.44$ . Достаточно надежно определенное содержание хрома и никеля, которые относятся к группе железа, также мало отличается от нормального:  $[\text{Cr I}, \text{Cr II}, \text{Ni I}/\text{Fe}] = -0.19$ . Близкая к солнечной металличность звезды сочетается с величиной системной гелиоцентрической лучевой скорости, принятой в разд. 2.2:  $V_{\odot} \approx -17 \text{ км/с}$ , характерной для звезд галактического диска.

*Тяжелые металлы.* Избыток бария по отношению к железу  $[\text{Ba}/\text{Fe}] = +0.46$  — факт ожидаемый, но редко наблюдаемый для атмосфер сверхгигантов на стадии post-AGB. Гораздо чаще в атмосферах этих звезд на этой стадии наблюдается дефицит элементов s-процесса [5, 38]. Впрочем, мы не получили избытка для иттрия, который также синтезируется за счет медленного процесса нейтронизации. Наличие или отсутствие избытка элементов s-процесса связано с исходной массой звезды и темпом потери массы на стадии AGB, определяющими ход эволюции конкретной звезды и массу звездного ядра. Моделирование процесса третьего перемешивания [39] показывает, что эффективность выноса продуктов реакций растет с ростом ядра (а следовательно, и исходной массы) post-AGB-звезды. Из расчетов Хервига [40]

следует также, что эффективность выноса растет при учете проникающей конвекции у основания конвективной зоны.

*О сепарации химических элементов в оболочке.* Известно, что в атмосферах звезд с газопылевыми оболочками селективная сепарация химических элементов может быть эффективным механизмом, создающим аномальную распространенность элементов. Однако для V2324 Cyg факт близкого к солнечному содержанию железа указывает на то, что конденсация на пылинки не происходит, поскольку железо относится к числу элементов, осаждение которых на пылинки идет эффективно. Аргументом является и нормальное содержание цинка:  $[\text{Zn}/\text{Fe}] = +0.09$ , что согласуется с типичным содержанием цинка  $[\text{Zn}/\text{Met}] = +0.04$  в большом диапазоне металличностей [41]. Отсутствие проявления селективной сепарации химических элементов трудно объяснить для звезды с ИК-избытком, обусловленным околозвездной оболочкой.

*Родственные объекты.* Среди ранее изученных есть кандидаты в PPN с картиной химического состава, подобной той, что получена для V2324 Cyg. Ареллано Ферро и др. [42], исследовавшие выборку звезд на стадии post-AGB, для одной из них, горячей звезды HD 172481 (IRAS 18384–2800) также нашли избыток лития. Основные параметры  $T_{eff} = 7250 \text{ K}$ ,  $\log g = 1.5$  также близки к таковым у V2324 Cyg. Однако в атмосфере HD 172481, в отличие от V2324 Cyg, усилены и тяжелые металлы. Кроме того, Райнерс и Ван Винкель [43] заподозрили, что HD 172481, также в отличие от V2324 Cyg,

является двойной системой. Поэтому эти две звезды не могут рассматриваться как полные аналоги.

Ближе к V2324 Cyg по совокупности параметров F-звезда HD 331319 (оптический компонент источника IRAS 19475+3119), имеющая металличность, близкую к солнечной, избыток гелия, кислорода и легких металлов (Na, Si) при дефиците титана и бария [44]. Как и в случае V2324 Cyg, в поверхностных слоях HD 331319, имеющей  $T_{eff} = 7200$  К и  $\log g = 0.5$ , также наблюдается избыток лития  $[Li/Fe] = +0.62$ . Интересно, что Клочкова и др. [44] обнаружили в спектре F-сверхгиганта HD 331319 линию гелия He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$  с эквивалентной шириной  $W_\lambda \approx 38 \text{ m\AA}$  и пришли к выводу о фотосферном происхождении линии гелия, а следовательно, о выносе продуктов его синтеза в ходе эволюции звезды. Что касается V2324 Cyg, то в ее спектре также нельзя отрицать присутствие линии He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$ , по крайней мере, для нескольких моментов наблюдений. Рис. 4, где линия He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$  в спектре V2324 Cyg, полученном 12.06.01, сопоставлена с синтетическим спектром, рассчитанным с параметрами  $T_{eff} = 7500$  К,  $\log g = 2.0$ ,  $\xi_t = 6.0$  км/с, подтверждает эту возможность. Для обеих звезд нет проявлений селективной сепарации химических элементов [42, 44].

Однако имея близкие эффективную температуру, металличности и детали химического состава, V2324 Cyg и HD 331319 существенно различаются по светимости и скорости вращения. Линии металлов в спектре HD 331319 узкие, а класс светимости — Ib, в то время как в спектре V2324 Cyg линии уширены вращением, а ее класс светимости, скорее всего, III. Существенно различаются в спектрах этих двух звезд и профили линии H $\alpha$ . В спектре HD 331319 профиль H $\alpha$  типичен для post-AGB-звезд (см. рис. 1 в работе [44]), а P Cyg-профиль H $\alpha$  в спектре V2324 Cyg, скорее, ближе к спектрам сверхгигантов. Здесь необходимо напомнить, что в случае V2324 Cyg очень высока скорость истечения вещества — она достигает сотен км/с, что на порядок выше типичных скоростей расширения оболочек для PPN.

Есть еще один из кандидатов в PPN, по особенностям спектра и химическому составу подобный исследуемой звезде. Это спектрально-переменная BD+48°1220, оптический компонент ИК-источника IRAS 05040+4820. Переменность спектра этой звезды обнаружена недавно по спектрам, полученным на 6-м телескопе [45], несколько позже [46] определены ее параметры и химический состав. Помимо близких температуры и распространенности ряда химических элементов (солнечная металличность, избыток лития

и натрия), сходство BD+48°1220 и V2324 Cyg проявляется в переменной профилей линий металлов, содержащих эмиссионный компонент, и в мощной эмиссии в линии H $\alpha$ . Возможная близость эволюционной стадии для BD+48°1220 и V2324 Cyg подтверждается и отсутствием спектральных деталей в их радио-спектрах. Однако у этой пары звезд есть и существенное различие — светимость: спектральная классификация дает класс светимости Ib для BD+48°1220. Величина ускорения силы тяжести, полученная методом моделей атмосфер, также различна:  $\log g = 2.0$  и  $0.0$  для V2324 Cyg и BD+48°1220 соответственно.

### 3.4. Проблема светимости и эволюционного статуса V2324 Cyg

Кинематическое определение расстояния в направлении на V2324 Cyg ( $l \approx 89.4^\circ$ ,  $b \approx 2.4^\circ$ ) ненадежно: лучевая скорость слабо зависит от расстояния по крайней мере до 2 кпк [47]. Однако избыток цвета и эквивалентные ширины межзвездных абсорбций NaI(1) и DIB (см. табл. 5) уверенно растут с расстоянием уже в пределах локального рукава. Их уровень у V2324 Cyg заметно ниже, чем у членов обширной ассоциации Cyg OB7, на которую звезда проецируется и которая, согласно Хэмфрис [48], удалена от нас на 0.8 кпк. Грубая оценка по указанным параметрам дает для V2324 Cyg расстояние  $d = 0.5 - 0.6$  кпк, что приводит к низкой величине светимости  $M_V \approx 1.6^m$ . Спектрально-фотометрическое определение расстояния на основе нашего спектрального класса (F2III) и фотометрии Архиповой и Иконниковой [10] ( $V = 11.7^m$  и  $B - V = 1.1^m$ ) приводит к еще меньшему расстоянию,  $d = 0.35 - 0.4$  кпк. Столь низкая светимость указывает и на низкую исходную массу звезды, что не согласуется с обнаруженным избытком лития. Согласно [49], избыток лития может возникнуть в процессе эволюции наиболее массивных AGB-звезд с исходными массами  $M \approx 7 M_\odot$ .

Впрочем, избыток лития в атмосфере звезды невысокой светимости подсказывает альтернативную эволюционную фазу для V2324 Cyg. Романо и др. [50], рассматривая традиционные механизмы обогащения межзвездной среды Галактики литием, уделяют внимание и феномену избыточного содержания лития в атмосферах F-гигантов с ИК-избытками. Часть этих Li-rich гигантов, еще не достигших стадии AGB и наблюдаемых на RGB, имеют низкие массы  $M < 2.5 M_\odot$ . В качестве механизма производства лития авторы [50] предлагают “cool bottom process”, в основе которого лежит производство бериллия, его перенос к основанию конвективной оболочки и последующее разрушение до ядер лития в приповерхностных слоях звезды. Здесь уместно сослаться на недавнюю работу

**Таблица 5.** Эквивалентные ширины  $W_\lambda$  межзвездных D-линий NaI и диффузных полос DIB. Для эквивалентных ширин D-линий NaI даны приблизительные оценки из-за сложности профиля D-линий (см. рис. 2)

Спектральная деталь	$W_\lambda, \text{Å}$
D2 5889	$\approx 0.40$
D1 5895	$\approx 0.37$
DIB 5512	0.08
DIB 5780	0.23
DIB 5797	0.13
DIB 5850	0.03
DIB 6196	0.04
DIB 6203	0.04
DIB 6379	0.07
DIB 6614	0.12
DIB 6661	0.03

Жесниевича и др. [51], в которой определено  $\varepsilon(\text{Li})$  для выборки G-K-гигантов и субгигантов с солнечной металличностью, причем наибольшие величины  $\varepsilon(\text{Li})$  получены для быстровращающихся звезд, у которых  $V \sin i \geq 30$  км/с. Однако, как мы уже отмечали выше, спектральные особенности в виде эмиссий не позволяют принять для исследуемой звезды статус красного гиганта.

В заключение приходится признать, что, несмотря на большой объем полученных нами данных, эволюционный статус V2324 Cyg остается неясным. На диаграмме ИК-цветов источник IRAS 20572+4919 располагается в области IV, заселенной планетарными и протопланетарными туманностями. В соответствии с хронологическими последовательностями Льюиса [52], отсутствие мазерного излучения в полосах OH и H<sub>2</sub>O [31] указывает на приближение системы к фазе планетарной туманности. Это обстоятельство сочетается с выводами публикаций [1, 11], в которых авторы рассматривают V2324 Cyg как звезду на стадии post-AGB. Однако со стадией post-AGB не согласуется ряд полученных нами свойств звезды. Прежде всего — ее невысокая светимость: спектральная классификация указывает на класс светимости III. Не сочетается со статусом post-AGB-звезды также профиль линии H $\alpha$  и очень высокая скорость ветра, присущие обычно сверхгигантам. Перспективу дальнейшего уточнения удаленности, массы и природы V2324 Cyg мы видим в накоплении информации не только о

самом объекте, но и о звездах в направлении на ассоциацию Cas OB7.

#### 4. ВЫВОДЫ

Впервые выполнена оптическая спектроскопия с высоким спектральным разрешением переменной V2324 Cyg, ассоциируемой с ИК-источником IRAS 20572+4919. В области длин волн от 4549 до 7880 Å отождествлено свыше 200 абсорбций (в основном линии Fe II, Ti II, Cr II, Y II, Ba II, Y II). Определены спектральный класс F0 II–III и скорость вращения  $V \sin i = 69$  км/с. Основная peculiarity спектра звезды — линии нейтрального водорода и D-линии NaI, имеющие сложный профиль типа P Cyg, причем профиль H $\alpha$  содержит мощный эмиссионный компонент.

По 9-ти спектрам, полученным в разные годы, мы не выявили ни систематический ход лучевой скорости  $V_r$  с глубиной линии R $\alpha$ , ни временную переменность  $V_r$ , что позволило принять среднее значение  $V_r = -16.8 \pm 0.6$  км/с за системную скорость,  $V_{\text{sys}} \approx -17$  км/с. По ядрам абсорбционных компонентов ветровых линий H $\beta$  и NaI получены значения скорости от  $-140$  до  $-225$  км/с (а скорости расширения соответствующих слоев — примерно от 120 до 210 км/с). Максимальная скорость расширения получена по синему компоненту расщепленной абсорбции H $\alpha$ : 450 км/с для даты 12.12.95.

Методом моделей атмосфер определены эффективная температура  $T_{\text{eff}} = 7500$  K, ускорение силы тяжести  $\log g = 2.0$ , микротурбулентная скорость  $\xi_t = 6.0$  км/с и металличность, которая равна солнечной. Основной особенностью химического состава звезды является избыток лития и натрия.

Близкая к солнечной металличность звезды в сочетании с величиной  $V_{\text{sys}} \approx -17$  км/с позволяет отнести звезду к населению галактического диска. Одним из выводов работы является неопределенность эволюционного статуса V2324 Cyg. Полностью ее свойства не согласуются ни с post-AGB, ни с RGB-стадией.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны М. В. Юшкину за помощь в наблюдениях и первичной обработке данных. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 08-02-00072 а), программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Протяженные объекты во Вселенной” и программы Президиума РАН “Происхождение и эволюция звезд и галактик”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Garcia-Lario, A. Machado, S. R. Pottash, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **82**, 497 (1990).
2. T. Blöcker, *Astrophys. Space Sci.* **275**, 241 (2001).
3. M. Busso, R. Gallino, and G. J. Wasserburg, *Annu. Rev. Astronom. Astrophys.* **37**, 239 (1999).
4. V. G. Klochkova, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **272**, 710 (1995).
5. V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.* **44**, 5 (1998).
6. L. Decin, H. Van Winckel, C. Waelkens, and E. J. Bakker, *Astronom. and Astrophys.* **332**, 928 (1998).
7. V. G. Klochkova and T. Kipper, *Baltic Astron.* **15**, 395 (2006).
44. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, Н. С. Таволжанская, *Pis'ma Astronom. Zh.* **28**, 49 (2002).
9. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, E. L. Chentsov, and M. V. Yushkin, *Astrophys. Bull.* **62**, 217 (2007).
10. В. П. Архипова, Н. П. Иконникова, *Pis'ma Astronom. Zh.* **20**, 700 (1994).
11. В. П. Архипова, Н. П. Иконникова, Р. И. Носкова, Г. В. Сокол, *Pis'ma Astronom. Zh.* **26**, 705 (2000).
12. T. M. Gledhill, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **356**, 883 (2005).
13. B. J. Hrivnak, S. Kwok, and T. R. Geballe, *Astrophys. J.* **420**, 783 (1994).
14. D. M. Kelly and B. J. Hrivnak, *Astrophys. J.* **629**, 1040 (2005).
15. P. Garcia-Lario, A. Machado, W. Pych, and S. R. Pottash, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **126**, 479 (1997).
16. H. Wishnewski and G. V. Coyne, *Vat. Obs. Publ.* **1**, № 11, 245 (1976).
17. C. B. Pereira and L. F. Miranda, *Astronom. and Astrophys.* **462**, 231 (2007).
18. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, И. Д. Найденев, et al., *Препринт No. 139 (Спец. астрофиз. обсерв. РАН, Нижний Архыз, 1999)*.
19. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Observ.* **44**, 127 (1998).
20. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. D. Najdenov, "The UV Universe: stars from birth to death", in *Proceedings of the Joint Discussion No. 4 during the IAU General Assembly of 2006*, Eds. by A. I. Gomez de Castro and M. A. Barstow (2007), p.179.
21. М. В. Юшкин, В. Г. Клочкова, *Препринт No. 206 (Спец. астрофиз. обсерв. РАН, Нижний Архыз, 2005)*.
22. Г. А. Галазутдинов, *Препринт No. 92 (Спец. астрофиз. обсерв. РАН, Нижний Архыз, 1992)*.
23. G. H. Jacoby, D. A. Hunter, and C. A. Christian, *Astrophys. J. Suppl.* **56**, 257 (1984).
24. R. O. Gray and R. E. Garrison, *Astrophys. J. Suppl.* **69**, 301 (1989).
25. Ph. Prugniel and C. Soubiran, *astro-ph/0409214* (2004).
26. Ph. Prugniel, C. Soubiran, M. Koleva, and D. Le Borgne, *astro-ph/0703658* (2007).
27. E. Solano and J. Fernley, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **122** 131 (1997).
28. V. G. Klochkova, G. Zhao, V. E. Panchuk, and S. V. Ermakov, *Chinese J. Astron. & Astrophys.* **4** 279, (2004).
29. R. Faraggiana, M. Gerbaldi, C. van't Veer, and M. Floquet, *Astronom. and Astrophys.* **201**, 259 (1988).
30. B. J. Hrivnak and J. H. Bjejing, *Astrophys. J.* **624**, 331 (2005).
31. O. Suárez, J. F. Gómez, and O. Morata, *Astronom. and Astrophys.* **467**, 1085 (2007).
32. D. Shulyak, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys.* **428** 993 (2004).
33. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 525 (1995).
34. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
35. M. Asplund, N. Grevesse, and A. J. Sauval, *ASP Conf. Ser.* **336**, 25 (2005).
36. Y. Takeda and M. Takada-Hidai, *Publ. Astronom. Soc. Japan* **46**, 395, (1994).
37. Y. Takeda, G. Zhao, M. Takada-Hidai, et al., *Chin. J. Astron. Astrophys.* **3**, 316, (2003).
38. H. Van Winckel, *Astronom. and Astrophys.* **319**, 561 (1997).
39. F. Herwig and S. M. Austin, *Astrophys. J.* **613**, L73 (2004).
40. F. Herwig, *Astronom. and Astrophys.* **360**, 952 (2000).
41. C. Sneden, R. G. Gratton, and D. A. Crocker, *Astronom. and Astrophys.* **246**, 354 (1991).
42. A. Arellano Ferro, S. Giridhar, and P. Mathias, *Astronom. and Astrophys.* **368**, 250 (2001).
43. H. van Reynders and H. Van Winckel, *Astronom. and Astrophys.* **365**, 465 (2001).
44. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, Н. С. Таволжанская, *Pis'ma Astronom. Zh.* **28**, 56 (2002).
45. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, *IBVS No. 5584* (2004).
46. В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов, Н. С. Таволжанская, В. Е. Панчук, *Astronom. Zh.* **84**, 714 (2007).
47. J. Brand and L. Blitz, *Astronom. and Astrophys.* **275**, 67 (1993).
48. R. M. Humphreys, *Astrophys. J. Suppl.* **38**, 309 (1978).
49. O. Straniero, R. Gallino, and S. Cristallo, *Nuclear Physics* **777**, 311 (2005).
50. D. Romano, F. Matteucci, P. Ventura, and F. D'Antona, *Astronom. and Astrophys.* **374**, 646 (2001).
51. G. Jasniewicz, A. Recio-Blanco, P. de Laverny, et al., *Astronom. and Astrophys.* **453**, 717 (2006).
52. B. M. Lewis, *Astrophys. J.* **338**, 234 (1989).

**V2324 CYG—AN F-TYPE STAR WITH FAST WIND****V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk**

High-resolution optical spectroscopy of the V2324 Cyg variable star associated with the IR source IRAS 20572+4919 is performed for the first time. More than 200 absorption features (mostly Fe II, Ti II, Cr II, Y II, Ba II, and Y II) are identified in the wavelength interval from 4549 to 7880 Å. The spectral type and rotation velocity of the star are found to be F0 III and  $V \sin i = 69$  km/s, respectively. Neutral-hydrogen and NaI D lines have complex P Cyg profiles. Neither systematic trend of radial velocity  $V_r$  with line depth  $R_o$  nor temporal variability of  $V_r$  have been found. We found that the value for the average heliocentric radial velocity is  $V_r = -16.8 \pm 0.6$  km/s. The radial velocities inferred from the cores of the absorption components of the H $\beta$  and NaI wind lines vary from  $-140$  to  $-225$  km/s (and the expansion velocities of the corresponding layers, from about 120 to 210 km/s). The maximum expansion velocity is found for the blue component of the split H $\alpha$  absorption: 450 km/s for 12.12.95. The method of model atmospheres is used to determine the following parameters of the star: effective temperature  $T_{eff} = 7500$  K, surface gravity  $\log g = 2.0$ , microturbulence velocity  $\xi_t = 6.0$  km/s, and metallicity, which is equal to the solar value. The main peculiarity of the chemical composition of the star is the overabundance of lithium and sodium. The results cast some doubt on the classification of V2324 Cyg as a post-AGB star.