

УДК 524.338-36

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ V471 TAU И HD 115404

© 2011 В. В. Шиманский^{1,2}, И. Ф. Бикмаев^{1,3}, Н. Н. Шиманская¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Академия наук Республики Татарстан, Казань, Россия

Поступила в редакцию 4 мая 2011 г.; принята в печать 25 августа 2011 г.

В работе исследован химический состав атмосфер одиночной К-звезды HD 115404 и вторичной компоненты предкатаклизмической переменной V471 Tau. Спектры высокого разрешения получены на Российско-Турецком 1.5-м телескопе РТТ150 и проанализированы с использованием методики моделирования синтетических спектров. В результате определены содержания 23 и 17 химических элементов в атмосферах HD 115404 и V471 Tau соответственно. Показано отсутствие аномалий химического состава HD 115404 и его соответствие литературным данным, полученным с использованием эквивалентных ширин линий. Найдено, что содержания 15 элементов от Na до Ba хорошо согласуются с металличностью атмосферы V471 Tau ($[Fe/H] = -0.22 \pm 0.12 \text{ dex}$), существенно отличной от средней металличности скопления Гиady. Установлено существование сильных избытков (более 1 dex) углерода и кислорода, связанных с обогащением атмосферы вторичной компоненты продуктами ядерного синтеза при прохождении системой стадии общей оболочки. В целом, показана близость аномалий химического состава в V471 Tau и других предкатаклизмических переменных.

Ключевые слова: звезды — переменные и пекулярные

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение методов моделирования спектров звезд при анализе предкатаклизмических переменных (ПП) позволяет не только получать оценки их фундаментальных параметров, но и изучать ряд тонких эффектов, связанных с современным состоянием систем и эволюцией. Одним из таких эффектов является формирование аномалий химического состава в атмосферах вторичных компонент при прохождении системами стадии общей оболочки. Исследования спектров ряда молодых ПП с sdO-субкарликами [1, 2] показали, что атмосферы холодных звезд в них имеют значительные (от 0.4 dex до 1.0 dex) избытки содержаний углерода, азота, кислорода, неона, магния, а также гелия. Данные элементы синтезируются в недрах главных компонент тесных двойных систем и частично аккрецируют на поверхность спутников. Поэтому изучение химического состава вторичных компонент ПП позволяет получить информацию как о процессах ядерного синтеза в ядрах главных компонент на поздних стадиях их эволюции, так и об эффективности обмена массой в системах, проходящих фазу общей оболочки. Однако сложность моделирования излучения молодых ПП, связанная с наличием у них больших эффектов отражения, не позволяет получать корректные оценки содержаний химических элементов. В этих условиях оптимальными

для определения химического состава оказываются старые ПП, содержащие К-звезды и имеющие малые (менее $\Delta V = 0.^m15$) эффекты отражения. Наиболее ярким и доступным для исследований представителем данной группы объектов является V471 Tau.

V471 Tau \equiv BD +15°516 открыта и классифицирована Нельсоном и Янгом [3] как затменная двойная система с орбитальным периодом $P_{\text{orb}} = 0^d.52118$. Соотношение продолжительностей полной фазы затмения (49.4 минуты) и времени выхода из него (55 секунд) указывали на наличие в системе белого карлика. Позднее Янг и Нельсон [4] по спектроскопическим наблюдениям нашли, что V471 Tau состоит из К-звезды главной последовательности и белого карлика массой $M_1 > 0.8 M_{\odot}$. Более точная классификация главной (DA2) и вторичной (K2V) компонент выполнена Гинаном и Сионом [5], доказавшими разделенность системы и отсутствие в ней значимого переноса массы. Высокая яркость V471 Tau ($m_b = 10^m.24$, $m_V = 9^m.48$) делает её доступной наблюдениям на малых и средних телескопах, что обусловило большое число специализированных исследований этого объекта. В них был определен набор высокоточных оценок параметров системы [6, 7], доказано наличие маломассивного третьего тела [8, 9], обнаружена хромосферная [10]

и вспышечная активность холодной звезды в оптическом [11] и рентгеновском [12] диапазонах, выполнено картирование ее поверхности на основе спектральных [13] и фотометрических [14, 15] наблюдений. В результате V471 Tau рассматривается в настоящее время как старая ПП с удаленным ($P_{\text{orb}} = 12100^d$) коричневым карликом, имеющая слабые эффекты отражения и магнитоактивную вторичную компоненту с сильно запятненной поверхностью.

Оценка химического состава вторичной компоненты V471 Tau, полученная Мартином и др. [16] на основе исследования оптических спектров, показала его близость к солнечному ($[X/H] = 0.0 \pm 0.1 \text{ dex}$) для большинства рассмотренных элементов (Al, Si, Ca, Fe). Одновременно корректное моделирование наблюдаемого профиля линии $\text{LiI } \lambda 6708 \text{ \AA}$ требовало повышенного, более чем в 25 раз, содержания лития во всех вариантах расчетов. Кроме того, в результате анализа рентгеновских спектров Стилл и Хусейн [17] нашли, что металличность короны вторичной компоненты V471 Tau $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.19 \pm 0.02 \text{ dex}$ оказывается заметно меньше металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.13 \text{ dex}$, характерной для звезд скопления Гиады. Полученные содержания ряда других элементов (O, Ne, Mg) существенно зависели от варианта расчетов, но в целом показывали избытки по сравнению с содержанием железа на 0.2–0.4 dex.

Содержания 16 элементов в атмосфере V471 Tau определены Шиманской и др. [18] с применением метода синтетического спектра при анализе спектральных наблюдений высокого разрешения. Была найдена близость содержаний Na, Al, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ba к средней металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.20 \pm 0.12 \text{ dex}$ при наличии сильных избытков углерода, кислорода и циркония (более 1.2 dex), умеренных избытков кремния (0.3–0.5 dex) и слабого дефицита магния (около –0.2 dex). Часть названных аномалий (избытки C, O, Zr) может быть обусловлена известными реакциями ядерного синтеза в недрах звезд на поздних стадиях эволюции и, вероятно, сформировалась при прохождении V471 Tau стадии общей оболочки. Однако последующее применение методики синтетического спектра при изучении предкатаклизмической переменной FF Aqr [19] и K-звезды HD 115404 показало необходимость ее модификации, связанной с уточнением атомных параметров существенно большего числа линий и жестким отбором наблюдаемых бленд, пригодных для определения содержаний химических элементов. Поэтому в рамках данной работы мы провели повторное исследование химического состава V471 Tau с использованием расширенного наблюдательного материала и улучшенной методики анализа спектров. Одновременно для

тестирования корректности применения данной методики к звездам K-класса мы определили химический состав одиночной стандартной звезды HD 115404, имеющей максимально близкий набор фундаментальных параметров. Полученные для V471 Tau новые результаты имеют лучшее согласие с прогнозами теории химической эволюции и с химическим составом FF Aqr, найденным нами в [19].

Раздел 2 содержит описание выполненных наблюдений обеих звезд и их обработки, а раздел 3 — методики исследования полученных спектров. В разделах 4 и 5 изложены результаты определения химического состава HD 115404 и V471 Tau соответственно, а также их анализ.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Спектральные наблюдения HD 115404 и V471 Tau выполнены в отличных и хороших астроклиматических условиях с размером звездных изображений не более $1.3''$ с применением кудэ-эшелле спектрометра CES, оснащенного ПЗС-матрицей (1160×1040 элементов), и установленного на Российско-Турецком 1.5-м телескопе РТТ150. Описание характеристик спектрометра можно найти по Веб-адресу: http://www.tug.tubitak.gov.tr/rtt150_coude.php. Для HD 115404 получено 6 спектров в ночи 16/17 и 17/18 марта 2007 г. (4 и 2 соответственно) с продолжительностью экспозиций 15 минут, для V471 Tau — 9 спектров в ночи 12/13 и 13/14 декабря 2005 г. (3 и 6 соответственно) с продолжительностью экспозиций 30 минут. Принятая продолжительность экспозиций обеспечила отношение сигнал/шум в спектрах HD 115404 около $S/N \approx 130$, в спектрах V471 Tau — $S/N = 30\text{--}37$ в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 4400\text{--}8000 \text{ \AA}$ при разрешении $R = 40000$. Журнал наблюдений V471 Tau представлен в Табл. 1 и содержит юлианские даты середины экспозиций, отношение сигнал/шум в полученных спектрах и фазы орбитального периода согласно эфемериде [9].

Первичная редукция спектров выполнена с применением модифицированных версий программных комплексов DECH95 и DECH20t [20] и включала все стандартные процедуры обработки двумерных эшелле-изображений и одномерных векторов. Для корректного учета вкладов теллурических линий в ночь 12/13 сентября 2006 г. дополнительно проведены наблюдения яркой звезды HD 11415 спектрального класса B7.

Нормированные спектры обеих звезд получены в пакете графической обработки информации

Таблица 1. Журнал спектроскопических наблюдений V471 Tau. Указаны ночи наблюдений, юлианские даты середины экспозиций *HJD*, фазы орбитального периода на это время согласно [9] и отношение сигнал/шум (*S/N*) в спектрах

Дата	<i>HJD</i>	φ	<i>S/N</i>
12/13.12.05	24553717.479	0.33	37
12/13.12.05	24553717.502	0.38	33
12/13.12.05	24553717.524	0.42	32
13/14.12.05	24553718.340	0.98	30
13/14.12.05	24553718.362	0.03	34
13/14.12.05	24553718.383	0.07	33
13/14.12.05	24553718.449	0.19	31
13/14.12.05	24553718.470	0.23	36
13/14.12.05	24553718.492	0.27	32

Origin 6.1 с выбором точек локального континуума на основе анализа теоретических спектров, рассчитанных с применением программы *SYNTH* [21]. При расчете использовались модели атмосфер [22] с параметрами $T_{\text{эф}} = 5040$ К, $\log g = 4.44$, $[A] = -0.2$ при $v \sin i = 85$ км/сек для V471 Tau и $T_{\text{эф}} = 5030$ К, $\log g = 4.3$, $[A] = -0.1$ при $v \sin i = 2$ км/сек для HD 115404. В качестве локального континуума приняты участки шириной не менее $\Delta\lambda = 1.0 \text{ \AA}$ с остаточной интенсивностью не менее $I_\lambda = 0.97$ для V471 Tau и $I_\lambda = 0.995$ для HD 115404, свободные от линий с эквивалентной шириной более $W_\lambda = 15 \text{ m\AA}$. В данных участках величина остаточной интенсивности в наблюдаемых спектрах принималась равной интенсивности в теоретических спектрах. Итоговые нормированные спектры V471 Tau сглаживались по 15 точкам для повышения отношения сигнал/шум. Отметим, что данная процедура сглаживания не приводила к заметным искажениям наблюдаемых профилей линий вследствие высокой скорости вращения исследуемой звезды ($v \sin i \approx 90$ км/сек). Усредненный по 6 экспозициям спектр HD 115404 сглаживался по 7 точкам с повышением отношения сигнал/шум до $S/N = 250$ при понижении эффективного разрешения до $R = 33000$.

Суммарные по экспозициям 1–3 и 4–6 ненормированные спектры V471 Tau для одного спектрального порядка представлены на Рис. 1(a), а соответствующие им нормированные — на Рис. 1(b).

Согласно выполненным к данному моменту фотометрическим исследованиям V471 Tau, ее кривая блеска слабо изменяется во времени, имеет амплитуду около $\Delta m_V = 0.^m11$ и формируется при совместном действии слабого эффек-

та отражения и сильной запытенности холодной компоненты [8, 11]. Картирование ее поверхности на основе анализа фотометрических данных [14] показывает наличие не менее 2 пятен с температурой на 20–30% ниже эффективной температуры звезды. Ротлер и др. [23] нашли, что влияние запытенности приводит к вариациям интенсивностей эмиссионных линий H I и Ca II, а Рамсейер и др. [24] и Хусейн и др. [13] обнаружили соответствующие слабые (около 5%) изменения профилей и интенсивностей линий поглощения Fe I и Ca I. Как видно из Табл. 1, наши наблюдения V471 Tau проведены в существенно разные интервалы фаз орбитального периода ($\varphi = 0.33-0.42$, $\varphi = 0.98-0.07$ и $\varphi = 0.19-0.28$), что может привести к вариациям интенсивностей исследуемых линий. Согласно данным [11], в фазах $\varphi \approx 0.00$ наблюдается локальный минимум блеска, а в фазах $\varphi \approx 0.35$ — локальный максимум с разницей светимостей около $\Delta m_V = 0.^m05$. Как видно на Рис. 1(b) различия интенсивностей линий поглощения в этих фазах не превышают 3–4% и обусловлены в основном ошибками наблюдений и проведения уровня континуума. Таким образом, мы пришли к выводу о незначительном влиянии эффектов запытенности холодной компоненты на наблюдаемые абсорбционные спектры и, следовательно, на результаты определения по ним химического состава. Поэтому все спектры V471 Tau были усреднены с их предварительным переводом в шкалу лабораторных длин волн путем учета лучевых скоростей вторичной компоненты на моменты наблюдений. Кроме того, мы ограничили наше исследование спектральным диапазоном $\Delta\lambda = 5300-7900 \text{ \AA}$, имеющим максимальный уровень накопления при минимальном вкладе излучения белого карлика (менее 1%) в полное излучение системы. В результате отношение сигнал/шум в указанном диапазоне усредненного, сглаженного спектра выросло до $S/N \approx 160$, что достаточно для корректного определения химического состава звезды.

3. МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Определение химического состава атмосфер V471 Tau и HD 115404 выполнено с помощью моделирования их синтетических спектров. Высокая скорость вращения холодной звезды в V471 Tau ($v \sin i \approx 90$ км/сек [11]) делает этот метод единственно пригодным для анализа сложных бленд линий с одновременным нахождением содержаний нескольких элементов. Красный карлик HD 115404 имеет малую скорость вращения ($v \sin i < 3$ км/сек), что позволяет получать оценки содержаний по эквивалентным ширинам отдельных линий. Однако для проверки метода моделирования синтетических спектров звезд K-класса мы

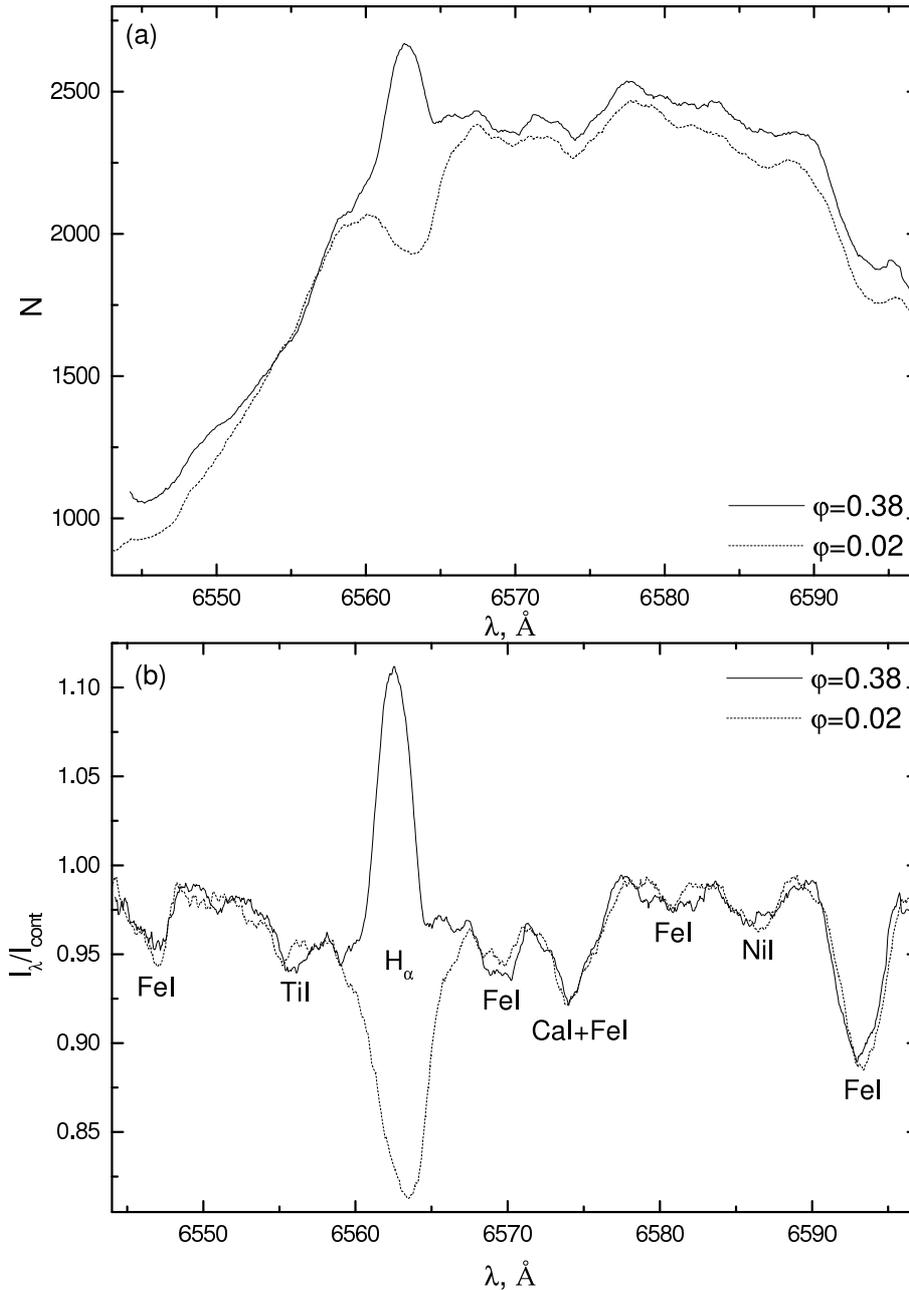


Рис. 1. Ненормированные (а) и нормированные (б) наблюдаемые спектры V471 Тау в двух фазах ($\varphi \approx 0.38$, $\varphi \approx 0.02$) орбитального периода. На Рис. 1б показана идентификация линий.

применили его одинаковым образом к V471 Тау и HD 115404.

Методика анализа спектров обеих звезд полностью идентична использованной ранее при изучении предкатаклизмической переменной FF Aqr и подробно изложена в работе [19]. Расчеты синтетических спектров проводились на базе модифицированной версии программного комплекса *SYNTH* [21] и бланкетированных моделей атмосфер [22]. При моделировании использовались около 30000 линий с длинами волн и силами ос-

цилляторов из каталога [25]. В расчетах профилей линий учитывались тепловое движение атомов, микротурбулентность с постоянной скоростью ξ_{turb} , макротурбулентность с заданной скоростью $V_{\text{масш}}$, скорость вращения звезд, естественное затухание, штарковское и ван-дер-ваальсовское уширение, изотопические сдвиги и сверхтонкая структура уровней согласно методике, описанной в [19]. Для 1400 наиболее важных линий, непосредственно используемых при нахождении содержаний, силы осцилляторов $\log(gf)$ и константы ван-дер-ваальсовского уширения C_6 были предварительно

исправлены [19] в рамках анализа потокового Атласа Солнца [26]. Таким образом была обеспечена полная дифференциальная привязка химического состава исследуемых звезд к солнечному.

Определение химического состава атмосфер V471 Tau и HD 115404 выполнялось путем согласования вычисленных и наблюдаемых профилей линий или бленд линий при варьировании содержаний образующих их химических элементов. Примеры такого согласования для отдельных участков спектров обеих звезд показаны на Рис. 2. В анализе использованы бленды, состоящие из линий не более трех элементов. Содержания элементов с вкладом менее 20% в полную эквивалентную ширину бленды фиксировались и принимались равными среднему содержанию, полученному по всем линиям данного элемента. Найденными считались содержания элементов, имеющих вклад в эквивалентную ширину бленды более 40%.

Параметры атмосферы вторичной компоненты V471 Tau приняты нами согласно результатам исследований [6, 7]. Наличие полных затмений в системе и кривых лучевых скоростей обеих компонент позволяет получить высокоточные оценки их масс и радиусов. Комбинация значений массы $M_2 = 0.93M_\odot \pm 0.04M_\odot$ и радиуса $R_2 = 0.93R_\odot \pm 0.04R_\odot$ [7] вторичной компоненты приводит к величине поверхностной силы тяжести $\log g = 4.44 \pm 0.03$. Современные оценки эффективной температуры звезды, полученные по фотометрии в В- и V-полосах ($T_{\text{eff}} = 5040$ K) [7], при моделировании кривых блеска с учетом затмений ($T_{\text{eff}} = 5000$ K) [14] и по инфракрасной фотометрии ($T_{\text{eff}} = 5500$ K) [27], в целом соответствуют ее спектральной классификации K2V. Используя величины инфракрасных показателей цвета $J - H = 0.376 \pm 0.041$, $J - K = 0.527 \pm 0.031$ и $V - K = 2.23 \pm 0.024$ [28] и данные теоретических расчетов [25], мы получили $T_{\text{eff}} = 5140 \pm 180$ K. В итоге мы пришли к выводу, что величина $T_{\text{eff}} = 5040 \pm 140$ K является оптимальной, т.к. позволяет корректно воспроизвести наблюдаемые глубины затмений в V471 Tau и соответствует результатам оптической и инфракрасной фотометрии. Металличность атмосферы $[Fe/H] = -0.22 \pm 0.12$ найдена в рамках настоящего исследования на основании 128 оценок содержаний железа (см. ниже). Скорость микротурбулентности принята на стандартном для K2V-звезд уровне $\xi_{\text{turb}} = 1.0$ км/сек, а скорость вращения $v \sin i = 87.5 \pm 2.5$ км/сек установлена из анализа наблюдаемых профилей линий.

Основной задачей исследования спектров HD 115404 являлась проверка используемой методики путем сравнения полученных по ней результатов с данными, опубликованными в литературе. Детальное определение содержаний 16 химических

элементов из анализа эквивалентных ширин линий выполнено Лаком и Хейтером [29] в рамках обзора объектов в окрестностях Солнца. Поэтому для корректного сравнения результатов нашей работы с данными [29] мы использовали аналогичный набор параметров атмосферы: $T_{\text{eff}} = 5035$ K, $\log g = 4.30$, $[A] = -0.11$, $\xi_{\text{turb}} = 0.5$ км/сек. Анализ наблюдаемых профилей показал, что скорость вращения звезды не превышает $v \sin i = 2$ км/сек и соответствующее ей уширение пренебрежимо мало по сравнению с уширением аппаратной функции спектрографа CES.

Анализ влияния ошибок параметров V471 Tau, проведенный с использованием 14 одиночных линий Al, Mg, Si, Cr, Fe, Ni, Ba разной интенсивности и потенциала возбуждения нижнего уровня, позволил получить следующие результаты:

1. Изменение эффективной температуры звезды на $\Delta T_{\text{eff}} = 140$ K приводит к повышению содержаний практически всех элементов, кроме Si. Вариации содержаний максимальны ($\Delta[X/H] = 0.10-0.12$ dex) для элементов с низким потенциалом ионизации (Al, Cr) и уменьшаются для большинства тяжелых элементов (Mg, Fe, Ni, Ba) до $\Delta[X/H] = 0.05$ dex. Кремний имеет отрицательные значения поправок около $\Delta[X/H] = -0.05$ dex.

2. Вариация поверхностной силы тяжести на $\Delta \log g = 0.05$ вызывает изменения содержаний менее $\Delta[X/H] = 0.01$ dex всех элементов, в том числе C, O, Mg, имеющих протяженные крылья.

3. Изменение металличности атмосферы в пределах $\Delta[Fe/H] = \pm 0.1$ dex не влияет на определение содержаний.

4. Повышение скорости микротурбулентности на $\Delta \xi_{\text{turb}} = 0.3$ км/сек уменьшает оценки содержаний разных элементов на $\Delta[X/H] = 0.03-0.04$ dex. Для наиболее сильных линий Fe, лежащих на участке насыщения кривой роста, а также для линий Ba, ошибка содержаний возрастает до $\Delta[X/H] = 0.07$ dex.

В итоге суммарные ошибки определения химического состава V471 Tau, обусловленные неточностью оценок параметров атмосферы, не превышают $\Delta[X/H] = 0.12$ dex для отдельных элементов.

При анализе химического состава FF Aqr [19] отмечено, что процедура нормировки спектров сильно влияет на ошибки содержаний элементов в атмосферах звезд с большой скоростью вращения. Вторичная компонента в V471 Tau имеет $v \sin i \approx 90$ км/сек, что порождает очень жесткие требования к точности проведения непрерывного спектра. Анализ шумов в усредненном спектре системы показывает, что ошибки в определении уровня континуума составляют 0.4% в области

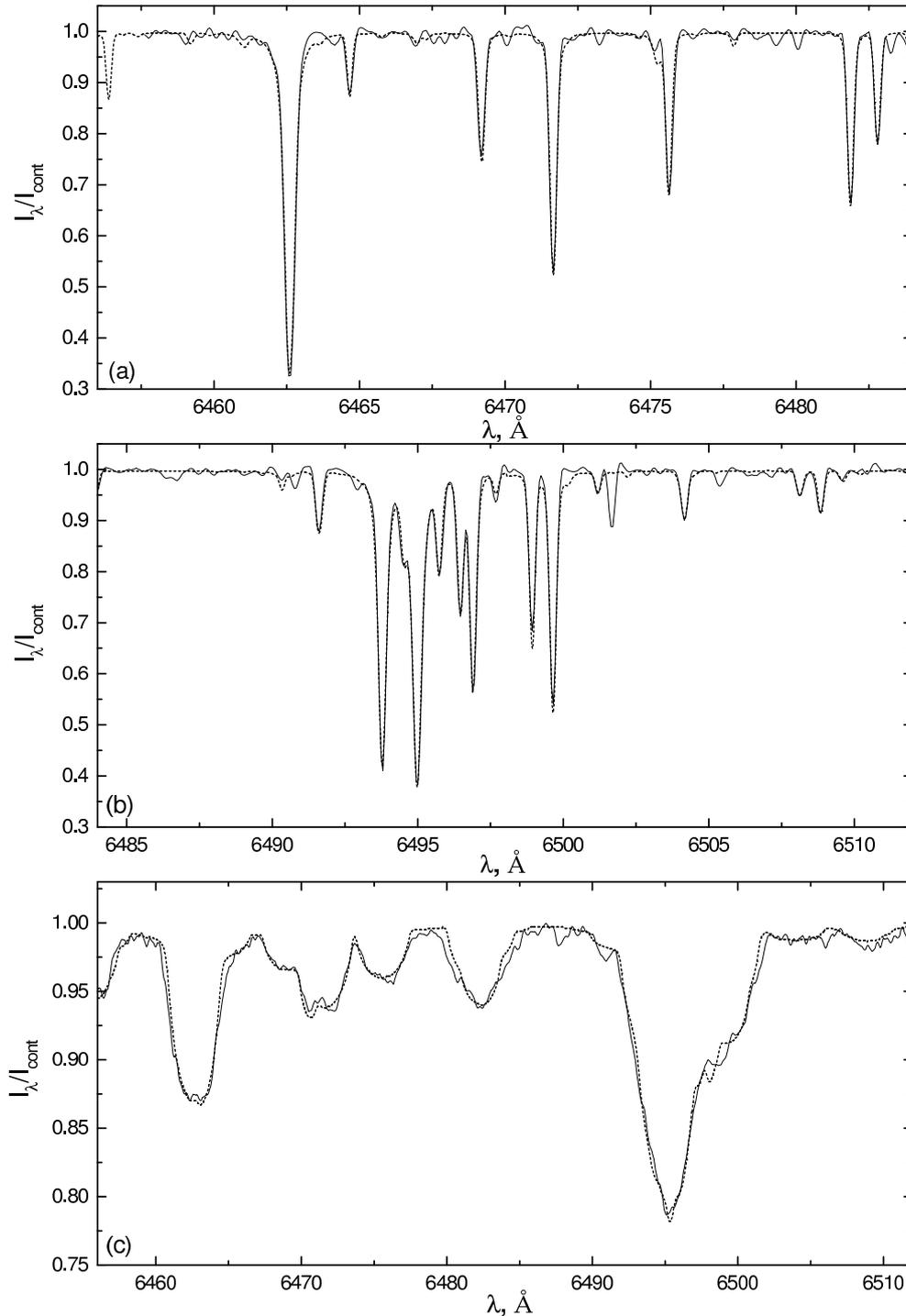


Рис. 2. Наблюдаемые (сплошные линии) и теоретические (штриховые линии) спектры HD 115404 (a,b) и V471 Tau (c).

$5900 \text{\AA} < \lambda < 7100 \text{\AA}$ и до 1.0% за пределами этого диапазона, а соответствующие им ошибки содержаний варьируются от 0.07 dex до 0.28 dex. Для повышения точности мы исключили из анализа линии, лежащие в областях неуверенного проведения континуума и на краях эшелле-порядков, а также бленды, содержащие линии более трех элементов. В итоге средняя ошибка содержаний,

получаемых по одиночным линиям, оценивается нами на уровне 0.12 dex, а по блендам линий — до 0.22 dex.

4. АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА HD 115404

В спектре HD 115404 (K2V) в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 5320\text{--}7900 \text{\AA}$ мы идентифицировали и

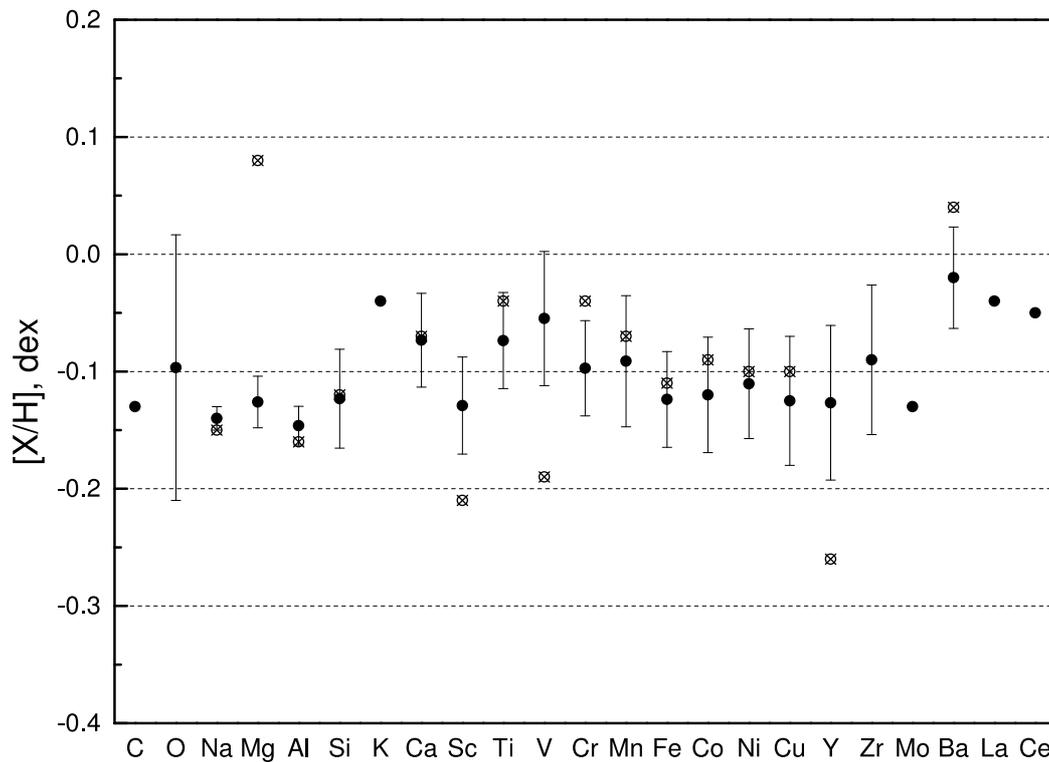


Рис. 3. Средние содержания химических элементов в атмосфере HD 115404 по результатам данной работы (залитые кружки) и исследования [29] (кружки с крестом).

исследовали профили 822 линий и бленд и получили 832 оценки содержаний 23 элементов. Полные данные о химическом составе звезды, включающие количество сделанных оценок для каждого элемента N , его среднее дифференциальное содержание $[X/H]$ и дисперсию содержаний по всем линиям σ , приведены в Табл. 2. На Рис. 3 представлено сравнение результатов анализа спектров HD 115404, выполненного в настоящей работе и в исследовании [29]. Для восьми изученных элементов (Si, Ca, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni) получено более двадцати пяти оценок, что обеспечивает ошибку среднего содержания не более $\Delta[X/H] = 0.05$ dex. Наличие не менее восьми оценок содержаний для четырёх элементов (Mg, Al, Sc, Mn) позволяет оценить погрешность их средних значений на уровне $\Delta[X/H] < 0.07$ dex. Для остальных элементов нами получены только единичные оценки содержаний со средней точностью около $\Delta[X/H] = 0.11$ dex.

Сравнительный анализ результатов данной работы и обзора [29] позволяет сделать следующие выводы:

1. Химический состав атмосферы HD 115404, полученный в обоих исследованиях, имеет качественно сходный характер и не показывает серьезных (более 0.15 dex) аномалий отдельных элементов относительно средней металличности. При этом в рамках данной работы изучено заметно

большее количество химических элементов и достигнуто лучшее согласие их содержаний с металличностью.

2. Содержания девяти элементов (Na, Al, Si, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Cu) совпадают в двух исследованиях в пределах 1σ -ошибок определения, а содержания пяти элементов (Sc, V, Cr, Y, Ba) — в пределах 2σ -ошибок. Отметим, что в работе [29] не представлены оценки ошибок полученных содержаний и число определений. Большая часть элементов, показывающая различие содержаний более 1σ , имеет в исследуемом спектральном диапазоне 2–3 линии, пригодные для анализа. Поэтому мы полагаем, что названные различия обусловлены только малой статистикой, и считаем их несущественными.

3. Содержания магния, найденные в двух исследованиях, различаются на 0.22 dex, что в 3 раза превышает возможную ошибку его определения в рамках данной работы. Оценка содержания из обзора [29] указывает на заметный избыток магния, не наблюдаемый у остальных элементов и трудно объяснимый с точки зрения звездной эволюции. Причиной появления этого избытка, возможно, является неполный учет в работе [29] эффектов ван-дер-ваальсовского уширения линий MgI, имеющих особо сильные крылья.

В целом, анализ наблюдений HD 115404 доказывает пригодность применяемой нами методики

Таблица 2. Средние содержания $[X/H]$ и дисперсии содержаний σ химических элементов в атмосферах HD 115404 и V471 Tau. N — число линий

	HD 115404			V471 Tau		
	$[X/H]$	σ	N	$[X/H]$	σ	N
C	-0.13		1	0.90		1
O	-0.10	0.11	3	1.10		1
Na	-0.14	0.01	2	-0.03		1
Mg	-0.13	0.02	10	-0.20	0.11	5
Al	-0.15	0.02	8	-0.26		1
Si	-0.12	0.04	50	-0.09	0.16	9
K	-0.04		1			
Ca	-0.07	0.04	30	-0.25	0.11	18
Sc	-0.13	0.04	11	-0.21	0.07	3
Ti	-0.07	0.04	74	-0.18	0.11	15
V	-0.05	0.06	33	-0.28	0.11	5
Cr	-0.10	0.04	52	-0.18	0.15	8
Mn	-0.09	0.06	16	-0.24	0.11	7
Fe	-0.12	0.04	414	-0.22	0.12	128
Co	-0.12	0.05	28	-0.26	0.15	3
Ni	-0.11	0.05	85	-0.16	0.11	28
Cu	-0.12	0.05	2	-0.24		1
Y	-0.13	0.07	3			
Zr	-0.09	0.06	3			
Mo	-0.13		1			
Ba	-0.02	0.04	3	-0.24	0.09	3
La	-0.04		1			
Ce	-0.05		1			

моделирования синтетических спектров для определения химического состава атмосфер K-звезд.

5. АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВТОРИЧНОЙ КОМПОНЕНТЫ V471 TAU

В спектре V471 Tau исследованы профили 183 одиночных линий и бленд и получено 237 оценок содержаний 17 элементов. Полные данные о химическом составе звезды приведены в Табл. 2 и на Рис. 4 в сравнении с химическим составом вторичной компоненты предкатаклизмической переменной FF Aqr из работы [19]. Для четырёх элементов (Ca, Ti, Fe, Ni) получено более 15 оценок содержаний с ошибкой среднего значения не более $\Delta[X/H] = 0.09$ dex, а для 5 элементов (Mg, Si, V, Cr, Mn) — от 5 до 10 оценок с ошибкой среднего до

$\Delta[X/H] = 0.15$ dex. Остальные элементы имеют не более 3 оценок, что ограничивает точность определения содержаний на уровне $\Delta[X/H] = 0.22$ dex.

Оценка среднего содержания железа $[Fe/H] = -0.22 \pm 0.12$ dex согласуется с данными предыдущего анализа [18] ($[Fe/H] = -0.20 \pm 0.12$ dex) и с результатами аппроксимаций рентгеновских спектров [17] ($[Fe/H] = -0.19 \pm 0.15$ dex), но существенно ниже приведенной в работе [16] ($[Fe/H] = 0.0 \pm 0.1$ dex). Следует отметить, что авторы [16] использовали более низкое значение эффективной температуры $T_{\text{eff}} = 4800 \pm 200$ K и более высокую величину скорости микротурбулентности $\xi_{\text{turb}} = 2.0$ км/сек, приводящие к уменьшению содержания железа. Поэтому найденная ими оценка металличности, близкая к солнечной, может быть объяснена только различиями в применяемых моделях атмосфер и силах осцилляторов линий. Полученное нами для V471 Tau значение $[Fe/H] = -0.22$ dex оказывается на 0.35 dex ниже металличности звезд скопления Гиады [17], что подтверждает сделанный на основании изучения кинематических характеристик звезд вывод [7] о ее неродственности данному скоплению.

Как видно на Рис. 4, содержания 14 элементов в атмосфере V471 Tau в пределах ошибок определения соответствуют содержанию железа. Незначительный избыток натрия $[Na/Fe] = 0.20$ dex, возможно, обусловлен низкой точностью оценки его содержания, полученной по одной линии. Однако наличие аналогичного избытка в атмосфере FF Aqr позволяет предположить частичное влияние не-ЛТР эффектов в атоме NaI, которые по данным моделирования [30] дают поправку к содержанию по линии NaI $\lambda 6154 \text{ \AA}$ около $\Delta[Na/H] = 0.12$ dex.

В рамках данного анализа спектров V471 Tau мы не подтвердили аномалий содержаний ряда элементов, обнаруженных нами ранее [18]. В частности, найденные в [18] избыток кремния ($[Si/Fe] = 0.35$ dex) и дефицит магния $[Mg/Fe] = -0.15$ dex объясняются неполным учетом констант ван-дер-ваальсовского уширения линий этих элементов. Исправленное содержание кремния ($[Si/H] = -0.09 \pm 0.16$ dex) показывает небольшой избыток (до 0.13 dex) относительно содержаний остальных элементов, вероятно, обусловленный остаточными ошибками в описании крыльев линий. Детальный анализ расширенного спектрального материала позволил использовать три слабо блендированные линии ScI для оценки его содержания. В результате показано его полное соответствие металличности ($[Sc/Fe] = 0.01$ dex), как было ранее предположено в [18].

При повторном определении химического состава V471 Tau особое внимание уделялось поискам аномалий в содержаниях тяжелых элементов,

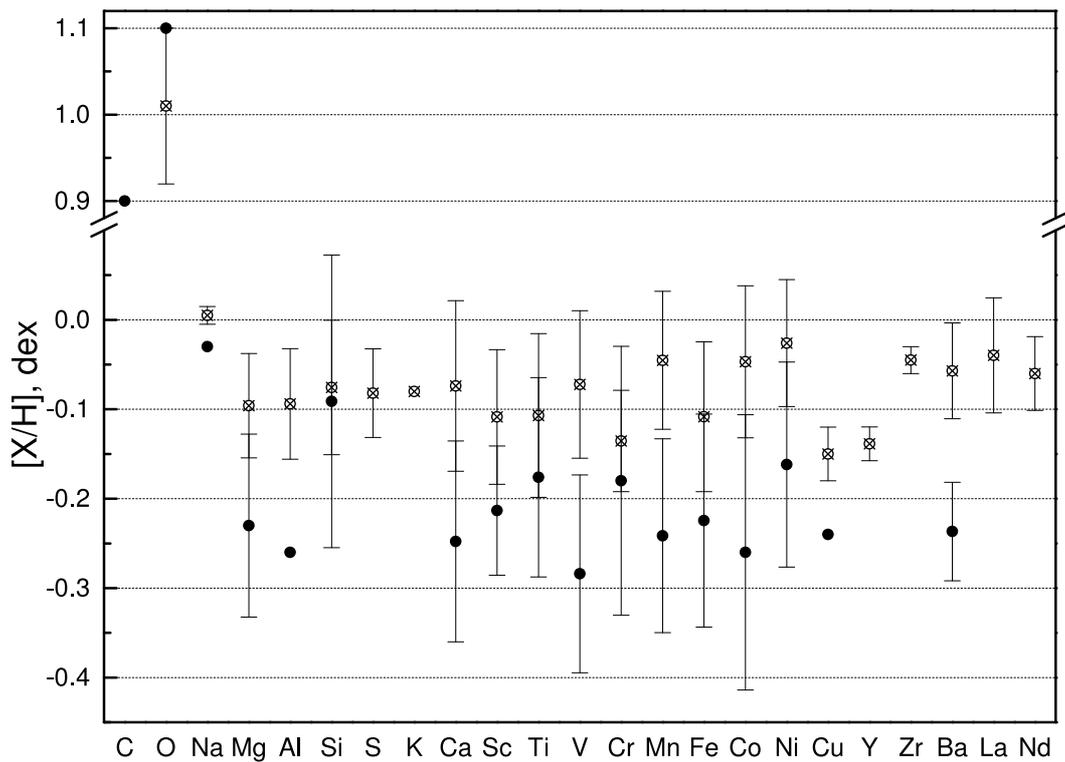


Рис. 4. Средние содержания химических элементов в атмосферах вторичных компонент V471 Tau (залитые кружки) и FF Aqr (кружки с крестом).

синтезируемых в *s*-процессе. Исследование профилей бленд, включающих линии ZrII, показало невозможность достоверного подтверждения сильных избытков циркония ($[Zr/Fe] \approx 1.0$ dex), обнаруженных ранее [18]. Теоретические профили бленд могут быть корректно согласованы с наблюдаемыми путем незначительного повышения содержания Ni, Fe и Ca. Для поиска избытков элементов *s*- и *r*-процессов мы провели сравнение наблюдаемых спектров с теоретическими, рассчитанными с повышением на 1.0 dex содержаний Sr, Y, Zr, Nd, Cs. В результате установлено, что высокая скорость вращения звезды и умеренное качество наблюдательного материала не позволяют обнаружить избытки менее 1 dex для всех элементов, кроме иттрия. Для данного элемента верхний предел возможного избытка определен на уровне $[Y/H] = 0.4$ dex.

Исследование спектров V471 Tau [18] позволило обнаружить значительные (до 1.5 dex) избытки содержаний углерода и кислорода, синтезируемых в реакциях горения гелия на поздних стадиях эволюции звезд. Аналогичные аномалии, найденные в атмосферах вторичных компонент FF Aqr [19], BE UMa [1], V477 Lyr [2] и других тесных систем, указывают на значительную аккрецию на них в стадии общей оболочки вещества, синтезированного в недрах главных компонент. С целью подтверждения реальности избытков C и

O в атмосфере V471 Tau мы провели детальное изучение ее спектров с отбором линий, позволяющих получить однозначную оценку содержания. Исследование 36 сильных линий CI показало, что только линии CI $\lambda\lambda 6587, 6655 \text{ \AA}$ пригодны для анализа, т.к. имеют достаточную интенсивность, попадают в эшелле-порядки спектрографа CES и слабо блендированы. Кроме того, линия CI $\lambda 5380 \text{ \AA}$ может использоваться для оценки верхнего предела содержания. Анализ их наблюдаемых профилей с вариацией содержаний углерода и блендирующих элементов позволил определить его избыток на уровне $[C/Fe] = 1.1 \pm 0.3$ dex. В списке из 18 сильных линий OI инфракрасный триплет OI $\lambda\lambda 7772, 7774, 7775 \text{ \AA}$ полностью пригоден для нахождения содержания кислорода, а линии OI $\lambda\lambda 5577, 6300 \text{ \AA}$ — для оценки его верхнего предела. В результате согласования наблюдаемых и теоретических профилей бленды инфракрасного триплета было получено $[O/Fe] = 1.3 \pm 0.2$ dex. Корректное воспроизведение наблюдаемых спектров на участках линий OI $\lambda 5577 \text{ \AA}$ и OI $\lambda 6300 \text{ \AA}$ требуют понизить данную оценку до $[O/Fe] = 1.0$ dex. Однако факт существования сильных избытков углерода и кислорода в атмосфере V471 Tau не вызывает сомнений.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное нами сравнение химических составов вторичных компонент V471 Tau и FF Aqr показало их качественное согласие, характеризующее следующими признаками:

1. Содержания всех нечетных легких элементов (Na, Al, K), кальция и элементов железного пика (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni) согласуются с содержанием железа. Полученный результат полностью соответствует современной теории химической эволюции [31], отрицающей возможность синтеза таких элементов в недрах главных компонент обеих систем, имевших начальную массу не более $M_1 = 6.00M_{\odot}$ [32].

2. Незначительны или полностью отсутствуют аномалии элементов α - (Mg, Si, S) и s -процессов (Ba), синтез которых возможен в недрах звезд с $M > 6.0M_{\odot}$ при формировании массивных белых карликов с $M > 0.8M_{\odot}$ [32]. Отметим, что избытки других элементов s - и r -процессов (Sr, Y, Zr, La, Ne) также отсутствуют в атмосфере FF Aqr и не могут быть обнаружены в атмосфере V471 Tau вследствие ее высокой скорости вращения. Как указано в [19], вторичная компонента V471 Tau имела непосредственный контакт с ядром главной компоненты перед выходом системы из стадии общей оболочки. В условиях интенсивного перемешивания вещества при орбитальном движении звезд вторичная компонента должна была значительно обогатиться вновь синтезируемыми элементами и, главным образом, элементами s -процесса. Избытки таких элементов (Sr, Y, Zr) до 0.8 dex найдены у ряда тесных двойных систем (LW Нуа, IN Com) [33], прошедших стадию общей оболочки. Поэтому наличие аналогичных избытков в атмосфере V471 Tau остается вероятным.

3. Существуют экстремальные (около 1 dex) избытки кислорода в атмосферах обеих звезд и сильные избытки углерода в атмосфере V471 Tau. Их природа несомненно связана с аккрецией на поверхность вторичных компонент вещества, синтезированного в слоевых источниках сверхгигантов на поздних стадиях эволюции главных компонент. В целом, найденные аномалии углерода и кислорода полностью соответствуют как прогнозам теории химического синтеза, так и найденным избыткам этих элементов в атмосферах ряда молодых предкатаклизмических переменных. Особую актуальность в этой проблеме приобретает определение содержаний азота, возможное при проведении высококачественных наблюдений в диапазоне $\Delta\lambda = 8600\text{--}9000 \text{ \AA}$. Отметим, что изучение ультрафиолетовых спектров системы [34] показало значительный избыток азота даже по отношению к углероду $[N/C] = 0.38 \text{ dex}$. Кроме того, остается актуальным более корректный анализ линий натрия с целью проверки небольшого избытка его

содержания в атмосферах V471 Tau и аналогичных звезд. Данный элемент частично синтезируется в процессах неон-натриевого цикла в звездах с $M > 3.0M_{\odot}$ на стадии главной последовательности и может аккрецировать на поверхность спутников в начальной фазе общей оболочки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты 09-02-97013-а и 10-02-01145-а). Авторы благодарны ТЮБИТАК за частичную поддержку в использовании РТТ150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп в Анталья).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. H. Ferguson and T. A. James, *Astrophys. J. Suppl.* **94**, 723 (1994).
2. В. В. Шиманский, С. А. Позднякова, Н. В. Борисов и др., *Письма в АЖ* **34**, 465 (2008).
3. B. Nelson and A. Young, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **82**, 699 (1970).
4. A. Young and B. Nelson, *Astrophys. J.* **173**, 653 (1972).
5. E. F. Guinan and E. M. Sion, *Astronom. J.* **89**, 1252 (1984).
6. K. Werner and T. Rauch, *Astronom. and Astrophys.* **324**, L25 (1997).
7. M. S. O'Brien, H. E. Bond, and E. M. Sion, *Astrophys. J.* **563**, 971 (2001).
8. C. Ibanoglu, S. Evren, G. Tas, and O. Cakiri, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **360**, 1077 (2005).
9. E. Kundra and L. Hric, *Astrophys Space Sci.* **331**, 121 (2011).
10. D. R. Skillman and J. Patterson, *Astronom. J.* **96**, 976 (1988).
11. K. Z. Kaminski, S. M. Rucinski, J. M. Matthews, et al., *Astronom. J.* **134**, 1206 (2007).
12. J. C. Pandey and K. P. Singh, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **387**, 1627 (2008).
13. G. A. J. Hussain, C. A. Prieto, S. H. Saar, and M. Still, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **367**, 1699 (2006).
14. V. Miranda, T. R. Vaccaro, and T. D. Oswalt, *Jour of the Southeastern Association for Research in Astronomy* **1**, 17 (2007).
15. T. R. Vaccaro and R. E. Vilson, *ASP Conf. Ser.* **279**, 167 (2002).
16. L. Martin, J. Pavlenko, and R. Rebolo, *Astronom. and Astrophys.* **326**, 731 (1997).
17. M. Still and G. Hussain, *Astrophys. J.* **597**, 1059 (2003).
18. Н. Н. Шиманская, И. Ф. Бикмаев, В. В. Шиманский и др., *Труды конференции Методы спектроскопии в современной астрофизике*, с. 350.
19. Н. Н. Шиманская, И. Ф. Бикмаев, В. В. Шиманский, *Астрофизический бюллетень* **66**, 332, (2011).
20. Г. А. Галазутдинов, *Препринт № 92* (Нижний Архыз, САО РАН, 1992).

21. N. E. Piskunov, in Proceedings of *International Meeting Physics and evolution of stars*, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1991 (Nauka, Sankt-Petersburg, 1992), p. 92.
22. F. Castelli and R. L. Kurucz, IAU Symp 210 *Modelling of Stellar Atmospheres*, A20 (2004).
23. L. Rottler, C. Batalha, A. Young, and S. Vogt, *Astronom. and Astrophys.* **392**, 535 (2002).
24. T. F. Ramseyer, A. P. Hatzes, and F. Jablonski, *Astronom. J.* **110**, 1364 (1995).
25. R. L. Kurucz, SAO CD-Roms (Cambridge, MA02138, USA, 1994).
26. R. L. Kurucz and I. Furenlid, J. Brault and L. Testerman, *Solar Flux Atlas from 296 to 1300nm* (Nat. Solar Obs., Sunspot, New Mexico, 1984).
27. M. Matranga, J. J. Drake, V. L. Kashyap, et al., *Astrophys. J.* **720**, L164 (2010).
28. R. M. Cutri, M. F. Surutskie, and S. van Dyn, The URSA 2MASS All Sky Point Source Catalog, (NASA, 2003).
29. R. E. Luck and U. Heiter, *Astronom. J.* **129**, 1063 (2005).
30. Л. И. Машонкина, В. В. Шиманский и Н. А. Сахибуллин, *Астрон. ж.* **77**, 893 (2000).
31. M. Samland, *Astrophys. J.* **496**, 155 (1998).
32. I. J. Iben and A. Tutukov, *Astrophys. J.* **418**, 343 (1993).
33. F. Thevenin and G. Jasiewicz, *Astronom. and Astrophys.* **320**, 913 (1997).
34. J. J. Drake and M. J. Sarna, *Astrophys. J.* **594**, 55 (2003).

ANALYSIS OF SPECTRA OF V471 TAU AND HD 115404

V.V. Shimansky, I.F. Bikmaev, N.N. Shimanskaya

We analyze the chemical composition of the atmospheres of a single K-type star HD 115404 and the secondary component of the V471 Tau variable. We use the technique of modeling of synthetic spectra to analyze the high-resolution spectra of these stars, taken with the RTT 150 Russian-Turkish telescope and find the abundances of 23 and 17 elements in the atmospheres of HD 115404 and V471 Tau, respectively. We demonstrate the lack of composition anomalies in the HD 115404 and show it to be consistent with the published data, inferred from equivalent widths of spectral lines. We find the abundances of 15 elements from Na to Ba to be consistent with the metallicity of the atmosphere of V471 Tau ($[Fe/H] = -0.22 \pm \pm 0.12dex$), which differs significantly from the average metallicity of the Hyades cluster. We show the existence of strong carbon and oxygen overabundances (by more than 1dex) due to the enrichment of the secondary by the nucleosynthesis products during the common-envelope stage of the system. On the whole, we demonstrate that V471 Tau and the other precataclysmic variables share similar composition anomalies.

Key words: *stars: dwarf novae—stars: variables: general—stars: individual: V471 Tau—stars: individual: HD 115404*