

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ FF AQR

© 2011 Н. Н. Шиманская¹, И. Ф. Бикмаев^{1,2}, В. В. Шиманский¹¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия²Академия Наук Республики Татарстан, Казань, Россия

Поступила в редакцию 21 февраля 2011 г.; принята в печать 19 марта 2011 г.

В работе определены параметры атмосферы вторичной компоненты тесной двойной системы FF Aqr и выполнен анализ ее химического состава. Серия спектров высокого разрешения в разных фазах орбитального периода получена на куде-эшелле спектрометре 1.5-м Российско–Турецкого телескопа (РТТ150). Показано изменение интенсивности линий поглощения тяжелых элементов с фазой, связанное с запятненностью холодной компоненты. Содержания тяжелых элементов в ее атмосфере определены с использованием метода моделирования синтетических спектров и дифференциального анализа химического состава FF Aqr относительно солнечного. В результате исследования усредненного спектра FF Aqr получено 539 оценок содержаний 21 химического элемента. Установлена близость металличности звезды ($[Fe/H] = -0.11 \pm 0.08$) к солнечной, что соответствует гипотезе о принадлежности FF Aqr диску Галактики. Полученный химический состав объекта не показывает аномалий элементов α -, r - и s -процессов, аналогичных найденным ранее в других системах (IN Com, LW Hya, V471 Tau). Отсутствие названных аномалий в FF Aqr объясняется, вероятно, невозможностью синтеза элементов тяжелее ^{16}O в ядре главной компоненты на поздних стадиях ее эволюции.

Ключевые слова: звезды — переменные и пекулярные

1. ВВЕДЕНИЕ

Тесные двойные системы (ТДС) с вырожденными компонентами образуются из широких звездных пар после прохождения ими стадии общей оболочки. В этой стадии главная компонента, расширяющаяся до размеров сверхгиганта, поглощает внешними слоями маломассивный спутник, который испытывает интенсивное торможение с потерей углового момента орбитального движения. Указанный процесс одновременно приводит к двум эффектам: тесному сближению звезд в системе и интенсивному перемешиванию вещества в околоядерных областях главной компоненты. Это вещество, обогащаясь продуктами реакций, происходящих в ядре и слоевом источнике, частично аккрецирует на поверхность спутника, изменяя его первичный химический состав. Таким образом, в атмосферах вторичных компонент могут появляться аномалии содержаний химических элементов. Обнаружение и детальное исследование подобных аномалий позволяет лучше понять физические процессы в двойных системах в фазах общей оболочки и механизмы ядерного синтеза в недрах звезд на поздних стадиях эволюции.

Детальный анализ химического состава вторичных компонент в основном возможен только для

разделенных ТДС, у которых светимость вторичной компоненты сравнима или выше, чем у главной. Группой звезд, оптимально отвечающих данным условиям, являются старые предкатаклизмические переменные (ПП). Они содержат остывающие белые карлики с $T_{eff} < 40000$ К и звезды $G0$ – $M2$ классов, близкие по характеристикам к главной последовательности. Исследование спектров таких объектов показало, что в их атмосферах наблюдаются аномалии содержаний химических элементов, обусловленные, возможно, взаимодействием компонент на стадии общей оболочки. В частности, Мартин и др. [1] обнаружили 20-кратный избыток содержания Li в атмосфере красного карлика V471 Tau, а Тевна и Ясниевич [2] — избытки элементов α -, r - и s -процессов в атмосферах компонент ядер планетарных туманностей Но Tr 4 (IN Com) и Abell 35 (LW Hya). При изучении наблюдаемых спектров V471 Tau [3] было найдено, что аномалии содержаний ряда элементов (C, O, Si, Zr) легко объяснимы в рамках современной теории ядерного синтеза. Одновременно некоторые аномалии (дефицит Mg) противоречат теоретическим прогнозам и должны быть изучены более детально. Поэтому в рамках данной работы мы провели аналогичное исследование химического

состава атмосферы FF Aqr — еще одной предкатаклизмической переменной, доступной спектроскопическим наблюдениям на телескопах средних размеров.

FF Aqr \equiv BD -3°5357 открыта Дворецки и др. [4] как затменная двойная система с орбитальным периодом $P_{\text{orb}} = 9.^d1207755$. Быстрый рост амплитуды затмения в ультрафиолетовом диапазоне ($\Delta V = 0.^m12$, $\Delta B = 0.^m4$, $\Delta U = 1.^m2$) указывал на присутствие в системе горячего компактного объекта в паре со звездой позднего спектрального класса. Продолжительность фазы полного затмения составляла более 13 часов, а время частных фаз — 24 минуты. Изучение ультрафиолетовых спектров FF Aqr, полученных спутником IUE, позволило определить температуру горячей звезды на уровне $T_{\text{eff}} = 40000 \pm 4000$ К. В результате Дворецки и др. [4] предложили модель системы, состоящей из голубого субкарлика и гиганта класса G8 III. Вне затмения FF Aqr показывала переменность с амплитудой, возрастающей в красном диапазоне спектра ($\Delta V = 0.^m35$, $\Delta B = 0.^m33$, $\Delta U = 0.^m22$). Характер данной переменности соответствовал действию эффектов отражения в ТДС, однако фазы максимума блеска во всех полосах существенно отличались от $\varphi = 0.50$. Поэтому изменения блеска были объяснены сильной запятненностью поверхности магнитоактивной холодной компоненты.

Комплексное исследование спектроскопических и фотометрических наблюдений FF Aqr выполнено Марили и др. [5]. Анализ кривых блеска звезды за 1990–1991 гг. показал, что амплитуда затмения в целом согласуется с данными [4]. Одновременно переменность в остальных фазах оказалась существенно слабее ($\Delta V = 0.^m12$, $\Delta B = 0.^m12$, $\Delta U = 0.^m17$), а максимум блеска соответствовал фазе $\varphi = 0.50$. Интенсивность эмиссионной линии H_{α} изменялась синхронно с фотометрической переменностью звезды, однако их амплитуда различалась в наблюдениях 1990 и 1991 годов. В целом, набор полученных данных свидетельствовал о действии в FF Aqr эффектов отражения в сочетании с запятненностью компонент. На основании измерений доплеровских смещений слабых линий поглощения Марили и др. [5] построили первую кривую лучевых скоростей вторичной компоненты с амплитудой $K_2 = 25 \pm 3$ км/сек. Анализ всех полученных данных в сочетании с теоретическим моделированием кривых блеска FF Aqr позволил им предложить ряд наборов ее фундаментальных параметров, в целом подтверждающих модель Дворецки и др. [4].

Результаты исследований [5] частично пересмотрены в работе Ваккаро и Вильсона [6] при изучении всех наблюдательных данных для FF Aqr за 1976–1998 гг. Было найдено, что форма кривой блеска вне затмений сильно изменяется со временем и обусловлена непрерывной перестройкой многочисленных пятен на поверхности вторичной компоненты. Ее картирование с использованием наблюдений 1998 г. показало наличие не менее четырех пятен, температура которых была на 15–25% ниже температуры окружающей поверхности. При этом эффективные температуры компонент FF Aqr определены как $T_{\text{eff}}^1 = 42000$ К и $T_{\text{eff}}^2 = 4758$ К. Полная амплитуда возможных эффектов отражения в системе не превышает 25% от амплитуды ее переменности. Одновременно вариации интенсивности линии H_{α} обусловлены флуоресценцией на поверхности холодной звезды, вызванной ультрафиолетовым облучением со стороны горячей компоненты. Однако наблюдаемая полуширина данной линии более чем в 2 раза превышает оценку, определяемую вращением вторичной компоненты ($V \sin(i) = 38$ км/сек) и найденную по слабым линиям поглощения. Причинами таких различий могут служить как эффекты уширения давлением при формировании линии H_{α} , так и наличие высокоскоростного ветра с поверхности гиганта. В заключении авторы [6] получили три полных набора параметров FF Aqr, зависящих от задаваемого отношения масс компонент. В рамках всех наборов оценки масс главной компоненты заключены в пределах $f(M_1) = 0.29–0.41 M_{\odot}$, т.е. она относится к классу *sdB*-субкарликов. Однако определение точных параметров системы окажется возможным только после выполнения цикла ее наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне и построения кривой лучевых скоростей горячей звезды.

Химический состав компонент FF Aqr не исследовался. В работе [6] найдена близкая к солнечной металличность холодного гиганта. При анализе ультрафиолетовых спектров системы [7] в излучении голубого субкарлика обнаружены линии ряда тяжелых элементов (*Si*, *Ge*, *Sn*, *Pb*), указывающие на металличность его атмосферы не ниже $[M/H] = -0.7$. Поэтому в рамках данной работы мы выполнили первый детальный анализ химического состава атмосферы вторичной компоненты. Нами показано, что металличность объекта незначительно отличается от солнечной, а в содержаниях отдельных элементов не наблюдается пекулярностей, связанных с прохождением FF Aqr стадии общей оболочки. В пункте 2 описывается процесс получения наблюдательного материала и его первичной обработки, а в пункте 3 — методика его

теоретического анализа на основе расчетов синтетических спектров. Пункт 4 содержит результаты определения содержаний элементов в атмосфере вторичной компоненты и их анализ с точки зрения предшествующей эволюции FF Aqr.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Эшелле-спектры FF Aqr с разрешением $R = 40000$ в диапазоне $\Delta\lambda = 3900\text{--}8700 \text{ \AA}$ получены на Российско-Турецком 1.5-м телескопе РТТ150 с помощью кудэ-эшелле спектрометра CES, оснащенного ПЗС-матрицей (1160×1040 элементов). Краткое описание технических характеристик спектрометра и результатов его исследования можно найти по Веб-адресу: http://www.tug.tubitak.gov.tr/rtt150_coude.php.

Наблюдения FF Aqr ($V = 9.^m35$) выполнены 12/13, 14/15, 18/19 сентября 2006 года в хороших астроклиматических условиях с размером звездных изображений менее $1.5''$. По своему видимому блеску звезда находится на пределе проникающей способности кудэ-спектрометра РТТ150 (РТТ150 CES). Поэтому в указанные ночи было выполнено, соответственно, 6, 4 и 2 экспозиции с продолжительностью 30 минут каждая. На этапе обработки все спектры, полученные в рамках одной ночи, были сложены для увеличения отношения сигнал/шум. Однако доминирование в оптическом диапазоне излучения холодной компоненты приводит к резкому падению уровня сигнала на длинах волн $\lambda < 5000 \text{ \AA}$. Кроме того, многочисленные линии тяжелых элементов образуют в данной области сложные бленды с шириной более $\Delta\lambda = 30 \text{ \AA}$, что исключает возможность уверенного проведения уровня континуума. В диапазоне с $\lambda > 7900 \text{ \AA}$ снижение квантовой эффективности ПЗС-матрицы и сильное блендирование теллурическими линиями делают спектры непригодными для анализа профилей линий. Поэтому мы выполнили исследование спектров FF Aqr в диапазоне $\Delta\lambda = 5350\text{--}7900 \text{ \AA}$.

Обработка спектров проведена с применением модифицированной версии программного комплекса DECH [8]. На этапе обработки спектров были выполнены все стандартные процедуры: экстракция одномерных векторов из эшелле-кадров, очистка спектров от следов космических частиц, сложение индивидуальных спектров, нормировка суммарных спектров на локальный континуум, построение дисперсионных кривых по калибровочным снимкам лампы "торий + аргон". Для корректного учета вкладов теллурических линий (см.

ниже) в ночь 12/13 сентября 2006 года дополнительно получены спектры яркой звезды спектрального класса $B7 \text{ HD } 11415$. Все наблюдаемые спектры были редуцированы в шкалу лабораторных длин волн путем учета лучевых скоростей вторичной компоненты на моменты наблюдений, согласно данным [6]. Ненормированные спектры одного спектрального порядка показаны на Рис. 1а, а нормированные — на Рис. 1б. Итоговое среднее отношение сигнал/шум в диапазоне $\Delta\lambda 5500\text{--}7900 \text{ \AA}$ составило: для наблюдений 12 сентября — $S/N = 50$, для наблюдений 14 и 18 сентября — $S/N = 30\text{--}35$.

Согласно исправленной эфемериде [6], наблюдения 12 сентября выполнены в фазе $\varphi = 0.509$ с максимальным влиянием эффектов облучения, а 14 и 18 сентября — в фазах $\varphi = 0.722, 0.152$, когда последние были незначительны. Анализ изменений интенсивностей эмиссионной линии H_α в разных фазах периода (см. Рис. 1б) показал, что они согласуются с выводом работы [6] о формировании эмиссий под влиянием флуоресценции. Кроме того, нами обнаружены синхронные вариации интенсивностей сильных абсорбционных линий тяжелых элементов с $W_\lambda > 150 m\text{\AA}$. Данные линии ослаблены на 6–9% в спектрах фазы $\varphi = 0.509$ относительно остальных фаз. С увеличением W_λ линий амплитуда их переменности слабо возрастает, но некоторые сильные линии (например, $FeI \lambda 6137 \text{ \AA}$) остаются постоянными во всех фазах. Изменение интенсивностей линий поглощения, вероятно, связано с изменением средней температуры видимой части поверхности вторичной компоненты. В частности, в диапазоне фаз $\varphi = 0.45\text{--}0.60$ наблюдаются максимумы блеска FF Aqr [5], что соответствует повышению средней температуры на $\Delta T_{eff} = 150\text{--}200 \text{ K}$, приводящему к ослаблению линий легко-ионизуемых атомов (например, $NaI \lambda\lambda 6154, 6160 \text{ \AA}$). Как будет показано ниже, эффективная температура холодной компоненты найдена нами с использованием фотометрических индексов FF Aqr, полученных в фазах с неизвестными уровнем блеска и степенью запятненности поверхности. Поэтому для минимизации ошибок содержаний, обусловленных неточностью определения T_{eff}^2 , мы анализировали спектр системы, полученный усреднением трех ненормированных спектров в разных фазах. Нормировка наблюдаемого спектра выполнялась на основе его сравнения с теоретическим, рассчитанным с применением программы *SYNTH* [9] для модели атмосферы [10] с параметрами $T_{eff} = 4700 \text{ K}$, $\lg g = 3.0$, $[A] = 0.0$. В качестве локального кон-

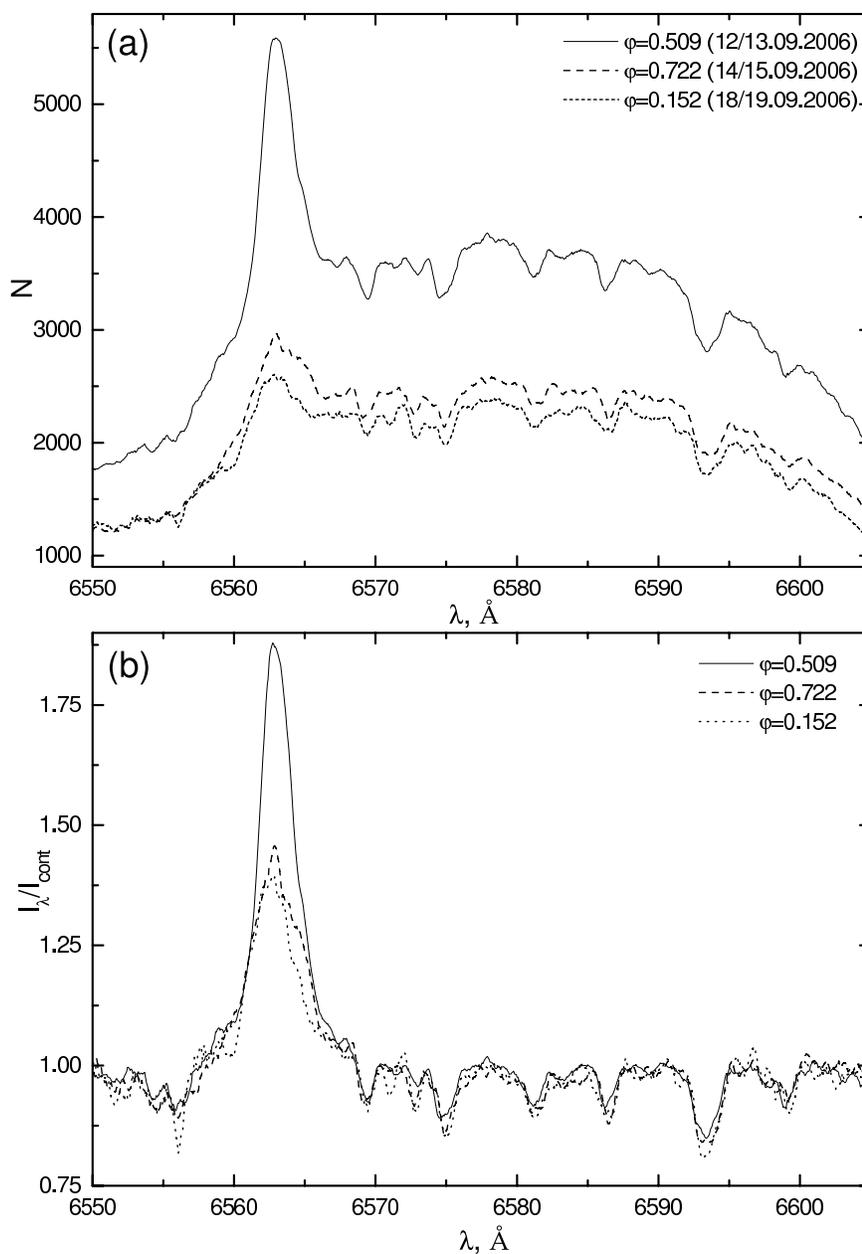


Рис. 1. Ненормированные (a) и нормированные (b) наблюдаемые спектры FF Aqr в различных фазах орбитального периода. На Рис. (a) указаны даты наблюдений.

тинуума выбирались участки шириной не менее $\Delta\lambda = 1.0 \text{ \AA}$ с остаточной интенсивностью не менее $I_\lambda = 0.97$, свободные от линий с эквивалентной шириной более $W_\lambda = 15 m\text{\AA}$. В данных участках величина остаточной интенсивности в наблюдаемом спектре принималась равной интенсивности в теоретическом спектре. Итоговый нормированный спектр сглаживался по 7 точкам для повышения отношения сигнал/шум до $S/N = 150$ в исследуемом диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 5350\text{--}7900 \text{ \AA}$.

3. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРОВ

Вторичная компонента FF Aqr имеет относительно высокую скорость вращения ($V \sin i = 38 \text{ км/сек}$ [6]), что приводит к сильному блендированию линий в ее спектрах. Поэтому единственным методом их корректного анализа для определения химического состава является сравнение с синтетическими спектрами объекта. Моделирование спектров мы выполняли с при-

менением программного комплекса *SYNTH* [9]. Вычисление коэффициентов непрерывного поглощения было частично исправлено и дополнено с учетом данных о сечениях ионизации с основных состояний тяжелых элементов [11] и возбужденных состояний *C*, *Na*, *Mg*, *Al*, *Si*, *S* и *Ca* [12] в первых двух стадиях ионизации. Отметим, что уточненные нами источники непрозрачности составляют не более 0.9% полного коэффициента поглощения в красном диапазоне спектров К-звезд типа FF Aqg. В расчетах использовался расширенный каталог спектральных линий, принятых нами согласно данным [13]. Модели звездных атмосфер для заданных параметров получены нами методом интерполяции [14] улучшенных сеточных моделей [10]. Для Солнца был принят следующий набор параметров: $T_{eff} = 5777$ К, $\lg g = 4.44$, $[A] = 0.0$. Шкала содержания химических элементов в атмосфере Солнца задавалась согласно данным [15].

Эффективная температура вторичной компоненты FF Aqg найдена с использованием инфракрасных показателей цвета $J - H = 0.54 \pm 0.01$, $J - K = 0.69 \pm 0.01$ [16], оптических показателей цвета в фазе полного затмения $U - B = 1.074 \pm 0.006$, $B - V = 0.818 \pm 0.003$ [5], коэффициента межзвездного покраснения $E_{B-V} = 0.021$ [16] и теоретических калибровок [13]. При усреднении найденных значений T_{eff} данные для оптического диапазона использовались с весом 0.5. В результате нами получены четыре оценки температуры в пределах $\Delta T_{eff} = 4570-4790$ К с усредненным значением $T_{eff} = 4690 \pm 90$ К.

Для определения поверхностной силы тяжести мы использовали точное значение радиуса вторичной компоненты $R_2 = 6.90 R_{\odot} \pm 0.01 R_{\odot}$, полученное из анализа кривой блеска, и три оценки ее массы $M_2 = 1.00-1.84 M_{\odot}$ для разных моделей FF Aqg из работы [6]. Отметим, что в рамках первой модели значение массы главной компоненты $M_1 = 0.29 M_{\odot} \pm 0.02 M_{\odot}$ оказывается неоправданно низким для проэволюционировавшей звезды диска Галактики, а масса вторичной компоненты ($M_2 = 1.00 M_{\odot}$) не согласуется с ее положением на эволюционных треках $T_{eff}-\lg L$ [17]. Поэтому данное значение массы M_2 не учитывалось нами при расчете $\lg g$. В результате значение силы тяжести на поверхности гиганта получено равным $\lg g = 2.90 \pm 0.12$.

Предварительное изучение нами металличности атмосферы вторичной компоненты на основе анализа 15 линий *FeI* и *NiI* показало, что она близка к солнечной ($[M/H] = -0.1 \pm 0.1$). Поэтому в исследовании мы использовали модель атмосферы с солнечной металличностью $[A] = 0.0$.

При расчетах профилей линий учитывались доплеровское уширение от теплового движения и микротурбулентности со скоростью ξ_{turb} , фиксированной для всех линий, естественное затухание, штарковское уширение согласно аппроксимации [18] и ван-дер-ваальсовское уширение с константами, определяемыми по классической оценке [19] и масштабированными индивидуально для разных линий (см. ниже). Для ряда элементов дополнительно учитывалась сверхтонкая структура энергетических уровней Na, Al, V, Mn, Co, Cu с использованием данных [20, 23] и изотопические сдвиги для Mg, K, Ca, Ba на основе оценок [20]. Линии, показывающие заметное влияние сверхтонкой структуры, но не имеющие ее теоретической оценки, исключались из анализа. Полученные спектры звезд сворачивались с аппаратной функцией спектрографа и уширялись за вращение звезд и макротурбулентность. Для Солнца скорость микротурбулентности принята равной $\xi_{turb} = 1.0$ км/сек [24], скорость вращения — $V \sin(i) = 1.8$ км/сек, а скорость макротурбулентности варьировалась индивидуально для каждой линии при согласовании ее наблюдаемого и теоретического профилей (см. ниже). Для вторичной компоненты FF Aqg использованы следующие значения параметров уширения: $\xi_{turb} = 1.0$ км/сек, $V \sin(i) = 38.0$ км/сек [6], $V_{macr} = 2.5$ км/сек. Отметим, что скорость макротурбулентности в этой звезде существенно меньше скорости вращения и не оказывает заметного влияния на спектры. Значение скорости микротурбулентности принято в соответствии со стандартными оценками для звезд классов K0 III. Ниже будет показано, что оно позволяет получить значения содержания железа, практически не зависящие от эквивалентных ширин исследуемых линий *FeI*, т.е. является корректной.

При моделировании спектров звезд мы учитывали около 31000 линий в исследуемом диапазоне длин волн, дающих вклад в полный коэффициент поглощения не менее 0.1%, атомные данные для которых представлены в [13]. Сравнение теоретического спектра Солнца с потоковым атласом [25] показало, что использование значений сил осцилляторов gf [13] приводит (см. Рис. 2а) к неудовлетворительному описанию наблюдаемых интенсивностей многих линий. Между тем, применение синтетических спектров в дифференциальном методе анализа химического состава требует высокой точности величин gf для всех наблюдаемых линий. Поэтому мы выполнили переопределение “солнечных” значений gf на основе точного согласования их теоретических и наблюдаемых профилей. В ис-

следовании нами использовался потоковый атлас Солнца [25] с параметрами $\Delta\lambda = 2900\text{--}13000 \text{ \AA}$, $S/N = 2000\text{--}9000$, $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 522000$. В процессе расчетов мы варьировали значения сил осцилляторов и констант ван-дер-ваальсовского уширения C_6 линий и скорости макротурбулентности V_{macr} в атмосфере Солнца до достижения наилучшего согласия теоретических и наблюдаемых профилей. Всего было проанализировано около 1330 профилей наблюдаемых линий в диапазоне длин волн $\Delta\lambda 5350\text{--}7900 \text{ \AA}$, попадающих в спектральные порядки эшелле-спектрографа. Пример итогового согласования наблюдаемого и теоретического спектров Солнца представлен на Рис. 2b.

Для ряда атомов в работах [24, 26] было найдено, что классическая формула Унзольда [19] дает заниженные оценки констант ван-дер-ваальсовского уширения C_6 . Наш анализ линий разных элементов показал, что все они могут быть объединены в две группы с масштабирующими коэффициентами к константам C_6 в диапазонах $\Delta \lg(C_6) = 0.65\text{--}0.80$ и $\Delta \lg(C_6) = 1.30\text{--}1.45$. Значения этих коэффициентов практически не зависят от исследуемого элемента, стадии ионизации и слабо возрастают с уменьшением энергии ионизации с верхних уровней соответствующих радиативных переходов. Поэтому в дальнейших расчетах профилей линий в спектрах звезд мы использовали два варианта комплекса *SYNTH* с масштабирующими коэффициентами $\Delta \lg(C_6) = 0.70$ и 1.40 . Выбор варианта для моделирования каждой линии производился путем анализа ее профиля в наблюдаемом спектре Солнца.

На Рис. 3 представлены масштабирующие поправки $k_f = \Delta \lg(gf)$ для приведения значений сил осцилляторов из списков [13] к солнечным. Около 40% исследуемых линий имеют поправки k_f менее $0.10 dex$ по абсолютному значению, а для 15% линий они превышают $0.50 dex$. Более 30 теоретических линий из данных [13] не наблюдаются на пределе обнаружения $W_\lambda < 1.5 m\text{\AA}$. Величины k_f в среднем возрастают с увеличением длины волны на $0.07 dex$ в пределах исследуемого диапазона и слабо уменьшаются с ростом энергии уровней. Усредненное значение k_f для всех линий с индивидуальными поправками менее $1.0 dex$ составило $k_f = -0.066 dex$.

Исследование спектра FF Aqr выполнено по методике, аналогичной примененной при изучении спектра Солнца. При этом применялся набор найденных нами ранее эмпирических сил осцилляторов gf и констант уширения C_6 , и варьировались только содержания химических

элементов, образующих наблюдаемые линии или бленды. Высокая скорость вращения гиганта ($V \sin(i) = 38.0 \text{ км/сек}$ [6]) приводит, как правило, к формированию в его спектрах бленд, состоящих из линий нескольких элементов. Поэтому нами проводилось предварительное отождествление наблюдаемых бленд с их разделением на три группы. В первую группу включены бленды, в которых доминирующая линия имеет вклад в общую эквивалентную ширину более 85%. Вторую группу составляют бленды, включающие две или более линии близкой интенсивности. В третьей группе содержатся бленды с заметным вкладом теллурических линий, не превышающим, однако, 20% ее общей эквивалентной ширины. Данный вклад оценивался путем сравнения спектра FF Aqr с наблюдаемым спектром HD 11415. Предварительное определение химического состава атмосферы гиганта проводилось путем моделирования профилей бленд первой группы с варьированием только содержания элемента, образующего основную линию. Данный химический состав считался начальным при анализе сложных бленд второй группы. Теоретические профили таких бленд согласовывались с наблюдаемыми путем изменения содержания элементов, образующих линии с вкладом более 20% в общую эквивалентную ширину. Бленды третьей группы исследовались в случае наличия в них линий элементов с малым числом оценок содержания. При этом мы анализировали только части их профилей, не имеющие значимых искажений теллурическими линиями. Примеры моделирования профилей различных бленд показаны на Рис. 4.

Отметим, что серьезной проблемой при анализе профилей линий всех групп являлась точность проведения уровня континуума. В красном и инфракрасном ($\lambda > 5900 \text{ \AA}$) диапазонах спектра, в основном содержащем неблендированные линии, уровень непрерывного спектра определялся с ошибками не более 1%, что обуславливало погрешности в определении содержания на уровне $0.06\text{--}0.09 dex$. Однако в диапазоне с $\lambda < 5900 \text{ \AA}$ многочисленные бленды линий, а также слабые молекулярные полосы TiO, MgH и др. приводили к понижению уровня континуума на 2–3%, что увеличивало ошибки определения содержания до $0.14\text{--}0.22 dex$. В итоге внутренняя точность полученных единичных оценок содержания элементов составляет $0.12 dex$ при анализе бленд первой группы и до $0.25 dex$ — при анализе бленд остальных групп.

Для исследования ошибок содержания различных элементов, обусловленных неточностью пара-

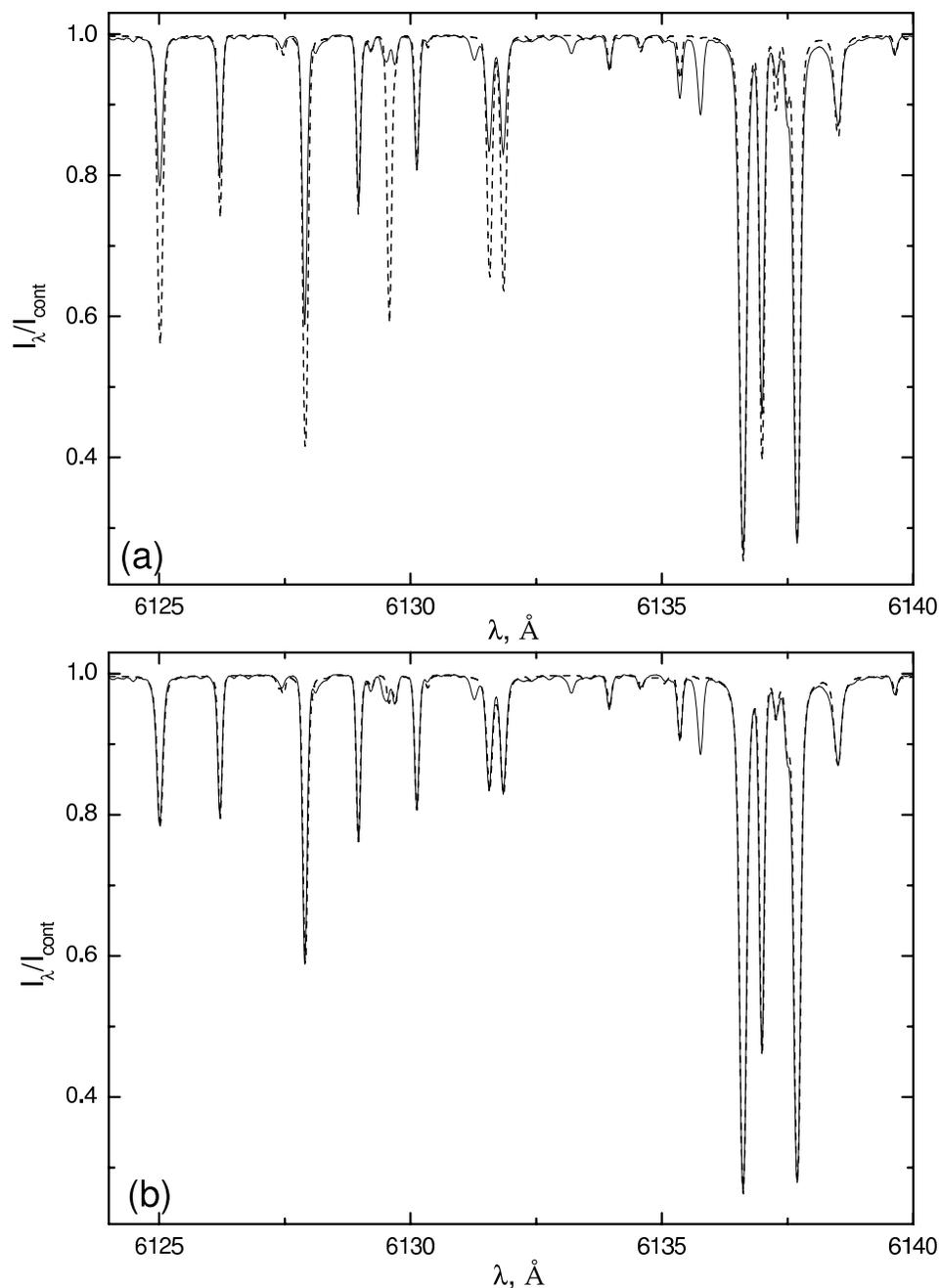


Рис. 2. Наблюдаемый (сплошные линии) и теоретические (штриховые линии) спектры Солнца, рассчитанные до (а) и после (б) уточнения значений сил осцилляторов линий.

метров атмосферы гиганта, мы выполнили анализ профилей 10 линий FeI , 5 линий MgI и 3 линий $BaII$, принадлежащих к первой группе, с варьированием значений T_{eff} на 100 K, $\lg g$ на 0.15 dex и ξ_{turb} на 0.2 км/сек. Результаты анализа приводятся в Табл. 1. В целом, при повышении эффективной температуры содержания всех рассмотренных элементов синхронно возрастают, тогда как рост

значения $\lg g$ приводит к увеличению содержаний наиболее тяжелых элементов. Указанные выше неопределенности в используемых величинах T_{eff} и $\lg g$ могут привести к незначительным ошибкам содержаний (0.03–0.04 dex). Одновременно, как видно из Табл. 1, содержания тяжелых элементов крайне чувствительны к заданной скорости микротурбулентности. Как будет показано ниже на

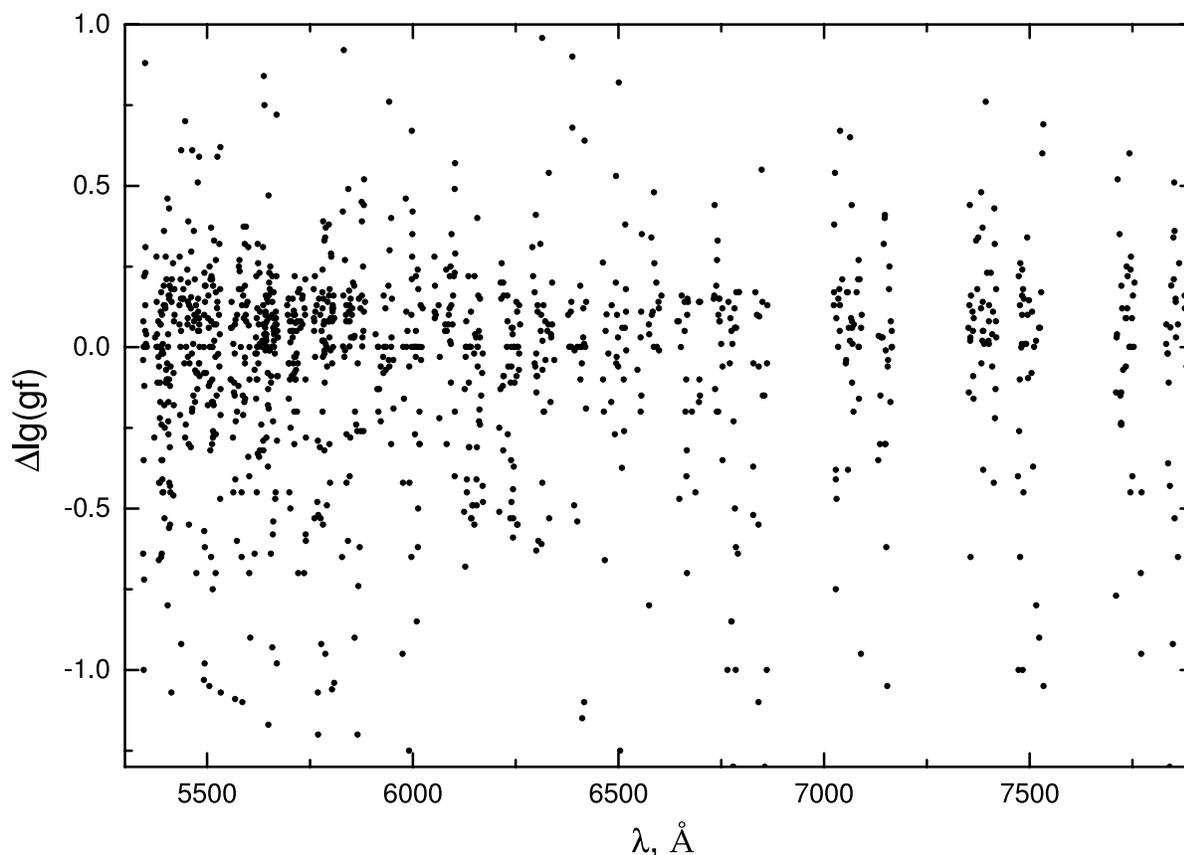


Рис. 3. Зависимость поправок $\Delta \lg(gf)$ к значениям сил осцилляторов линий [13] от длины волны.

основе анализа зависимости $W_\lambda - [Fe/H]$, значение ξ_{turb} , принятое в данной работе, завышено не более чем на 0.1 км/сек. В результате ошибки содержаний, обусловленные неточностью используемой величины ξ_{turb} , составляют около 0.05 dex для элементов группы железа, менее 0.03 dex — для легких элементов и до 0.08 dex — для тяжелых элементов. Суммарные ошибки анализа химического состава FF Aqr, вызванные погрешностями при определении параметров ее атмосферы, оценены нами на уровне 0.06 dex для легких элементов, 0.08 dex — для элементов группы железа и 0.10 dex — для тяжелых элементов.

4. АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА FF AQR

При исследовании спектра FF Aqr в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 5350-7900 \text{ \AA}$ нами проанализированы профили 376 бленд линий и получено 539 оценок содержаний 21 химического элемента. Средние дифференциальные значения содержаний $[X/H]$, их дисперсии и количество определений представлены

Таблица 1. Поправки (в dex) содержаний ряда химических элементов при изменении параметров атмосферы вторичной компоненты FF Aqr

	T_{eff}	$\lg g$	ξ_{turb}
Δ	100K	0.15dex	0.2 км/сек
<i>MgI</i>	0.03	0.00	-0.02
<i>FeI</i>	0.04	0.02	-0.07
<i>BaII</i>	0.04	0.02	-0.11

в Табл. 2 и на Рис. 5 в сравнении с аналогичными данными для V471 Tau из работы [3]. На Рис. 6 показаны очень слабые зависимости найденных содержаний железа $[Fe/H]$ от длин волн и эквивалентных ширины исследуемых линий *FeI*.

Металличность вторичной компоненты FF Aqr ($[Fe/H] = -0.11 \pm 0.08$), определенная из анализа более 240 линий *FeI*, соответствует металличности звезд тонкого галактического диска. Данный факт согласуется с положением системы вблизи галак-

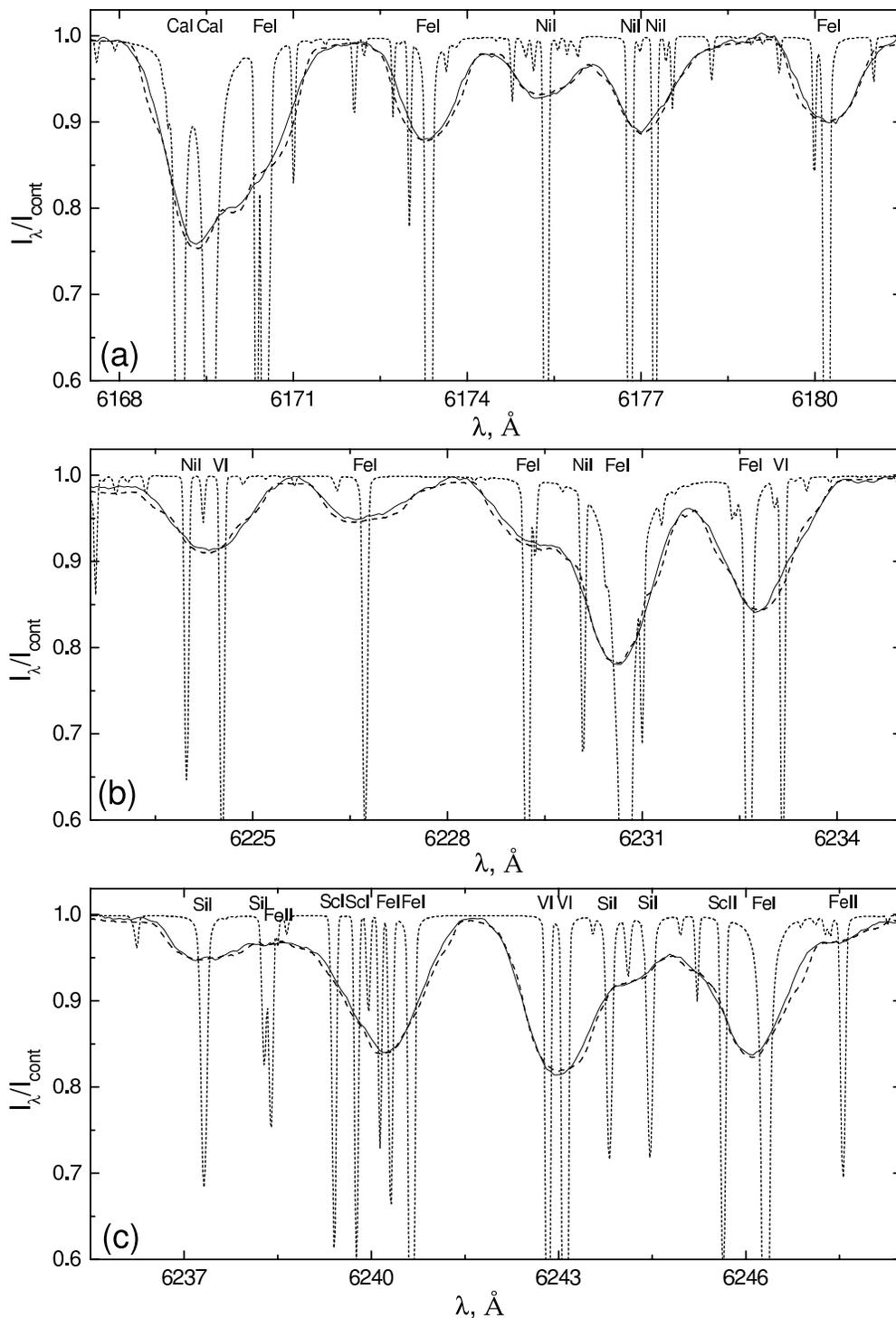


Рис. 4. Наблюдаемый (сплошная линия), неуширенный (пунктирная линия) и уширенный за скорость вращения звезды (штриховая линия) теоретические спектры FF Aqr в ряде диапазонов длин волн.

тической плоскости ($z = 30\text{--}50$ пс) и малой лучевой скоростью ее центра масс ($\gamma = 29 \pm 2$ км/сек [5]). Масса вторичной компоненты ($M_2 \approx 1.4 M_{\odot}$ [6]) в сравнении с ее положением на восходящей ветви

гигантов позволяют оценить возраст системы на уровне $T = 5\text{--}8 \times 10^9$ лет, что подтверждает ее принадлежность диску Галактики. Таким образом, металличность атмосферы гиганта в FF Aqr соот-

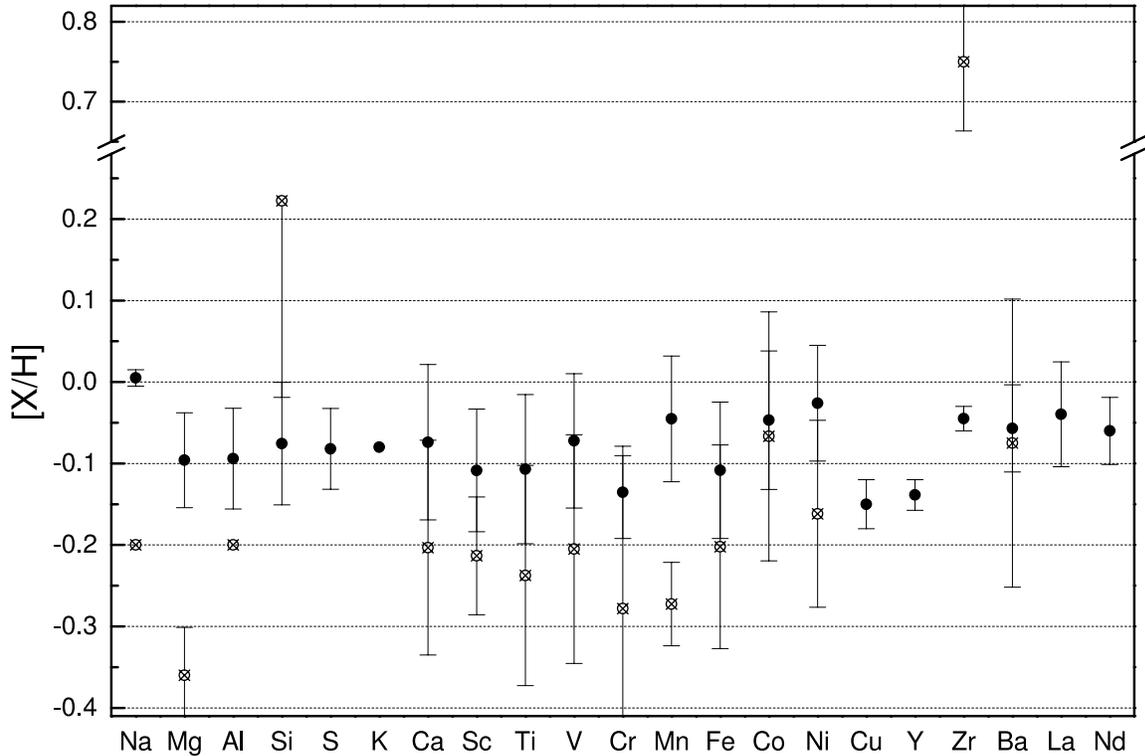


Рис. 5. Средние содержания химических элементов в атмосферах вторичных компонент FF Aqr (черные кружки) и V471 Tau (кружки с крестом).

ветствует кинематическим и физическим характеристикам объекта.

Как видно на Рис. 6а, полученные нами значения $[Fe/H]$ незначительно (на $0.05 dex$) растут с увеличением длины волны исследуемых линий. Такое уменьшение объясняется возрастанием в коротковолновом диапазоне спектра FF Aqr вклада главной компоненты. Величина такого вклада на $\lambda = 5350\text{--}7900 \text{ \AA}$ оценена нами на уровне 2–8% из анализа наблюдаемых кривых блеска в полосах V и R , представленных в работе [6]. Соответствующая часть излучения, принятая плоским континуумом без линий, вычиталась из наблюдаемых спектров во всем диапазоне длин волн. К сожалению, переменность вторичной компоненты FF Aqr и отсутствие точных данных о радиусе и температуре ее главной компоненты вносят небольшие (порядка 2%) ошибки в оценку вклада горячего субкарлика в блеск системы на длинах волн $\lambda > 5300 \text{ \AA}$.

Найденные содержания железа $[Fe/H]$ незначительно уменьшаются (см. Рис. 6b) с ростом эквивалентных ширин W_λ исследуемых линий. В диапазоне $W_\lambda = 20\text{--}190 m\text{\AA}$ уменьшение содержаний составляет $\Delta[Fe/H] = -0.01 dex$, а в диапазоне

$W_\lambda = 200\text{--}350 m\text{\AA}$ — $\Delta[Fe/H] = -0.02 dex$. Аппроксимация полной зависимости $W_\lambda - [Fe/H]$ полиномом второй степени не выявляет минимума или максимума содержаний для линий, находящихся на участке насыщения кривой роста ($W_\lambda = 120\text{--}220 m\text{\AA}$), что указывает на корректность принятой скорости микротурбулентности $\xi_{turb} = 1.0 \text{ км/сек}$. Найденное уменьшение содержаний $[Fe/H]$ с ростом W_λ , вероятно, объясняется концентрацией сильных линий в синем диапазоне спектра, где, как сказано выше, возрастает вклад излучения горячей компоненты.

Для 7 химических элементов (Si, Ca, Ti, V, Cr, Fe, Ni) было получено (см. Табл. 2) по 20 и более оценок содержаний $[X/H]$, а для 3 элементов (Sc, Mn, Co) — от 10 до 20 оценок, что позволяет повысить внутреннюю точность определения средних значений $[X/H]$ до $0.08\text{--}0.10 dex$. Точность найденных нами средних значений $[Mg/H]$, $[Al/H]$, $[S/H]$, $[Nd/H]$ с учетом ограниченного числа исследованных линий оценивается на уровне $0.13 dex$. Для Na, K и большинства тяжелых элементов получены единичные оценки содержаний, точность которых не превышает $0.18 dex$.

Таблица 2. Химический состав атмосферы FF Aqr. $[X/H]$ — среднее содержание элемента, полученное по всем линиям, σ — дисперсия содержаний, N — количество определений.

	$[X/H]$	σ	N		$[X/H]$	σ	N
	dex	dex			dex	dex	
Na	-0.00	0.01	2	Mn	-0.05	0.08	16
Mg	-0.10	0.05	7	Fe	-0.11	0.08	239
Al	-0.09	0.06	5	Co	-0.05	0.08	16
Si	-0.08	0.08	27	Ni	-0.03	0.07	65
S	-0.08	0.05	5	Cu	-0.15	0.03	2
K	-0.08		1	Y	-0.15	0.02	3
Ca	-0.07	0.10	23	Zr	-0.04	0.02	2
Sc	-0.11	0.08	14	Ba	-0.06	0.05	3
Ti	-0.11	0.09	49	La	-0.04	0.07	3
V	-0.07	0.08	27	Nd	-0.06	0.04	4
Cr	-0.14	0.06	26				

Как видно на Рис. 5, химический состав атмосферы гиганта FF Aqr в пределах ошибок определения полностью соответствует металличности. В частности, для элементов α -процесса (Mg, Si, S, Ca) полученные средние содержания равны $[X/H] = (-0.07) - (-0.11)$, для нечетных легких элементов (Al, K) — $[X/H] = (-0.08) - (-0.09)$, для четных элементов группы железа (Ti, Cr, Ni) — $[X/H] = (-0.03) - (-0.11)$, для нечетных элементов группы железа (V, Mn, Co) — $[X/H] = (-0.05) - (-0.07)$, для меди и всех тяжелых элементов r - и s -процессов (Y, Zr, Ba, La, Nd) — $[X/H] = (-0.04) - (-0.14)$.

Сравнение химических составов вторичных компонент FF Aqr и V471 Tau (см. Рис. 5) показывает их существенные различия. В частности, в атмосфере FF Aqr нами не обнаружены аномалии содержаний магния, кремния и циркония, найденные ранее в V471 Tau [3]. Данные элементы синтезируются в реакциях α - и s -процессов в ядрах звезд с массой $M > 4.00 M_{\odot}$ на поздних стадиях их эволюции. Современная масса белого карлика в V471 Tau составляет $f(M_1) = 0.83 M_{\odot}$ [27], что соответствует его начальной массе $M > 6.00 M_{\odot}$ [28]. Поэтому в недрах данной звезды в стадии гиганта и сверхгиганта происходил активный синтез элементов

α - и s -процессов с их последующей частичной аккрецией на поверхность вторичной компоненты. Масса голубого субкарлика в FF Aqr не превышает $M_1 = 0.41 M_{\odot}$ [6], что ограничивает начальную массу звезды на уровне $M = 1.80 M_{\odot}$ [28]. Таким образом, отсутствие зарегистрированных аномалий химического состава в данной системе обусловлено, вероятно, невозможностью синтеза элементов с $Z > 8$ в процессе предшествующей эволюции ее главной компоненты.

Однако у FF Aqr возможны аномалии содержаний элементов группы CNO , синтез которых допустим при формировании вырожденных звезд с $M_1 > 0.35 M_{\odot}$. Аналогичные аномалии с величиной до $1.0 dex$ найдены ранее для атомов углерода и кислорода в атмосфере V471 Tau [3], а также у вторичных компонент ряда молодых ПП [29]. Поэтому мы провели специальный анализ бленд, содержащих слабые линии CI и OI для оценки их содержаний. Он показал, что в атмосфере FF Aqr содержание углерода не превышает $[C/H] = 0.5 dex$. Одновременно в спектрах системы нами обнаружены усиленные линии OI $\lambda\lambda 7772, 7774, 7775 \text{ \AA}$, имеющие существенную переменность с фазой орбитального периода. Изучение их профилей в усредненном спектре указывает на возможный избыток кислорода $[O/H] = 1.1 \pm 0.2 dex$, что согласуется с данными для V471 Tau [3]. Однако сильная переменность линий и их расположение на краю эшелле-порядка делают результаты анализа ненадежными. Поэтому вопрос о реальности избытков углерода и кислорода в атмосфере FF Aqr требует проведения дальнейших исследований.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ спектров высокого разрешения предкатаклизмической переменной FF Aqr показал, что в атмосфере ее вторичной компоненты отсутствуют аномалии содержаний элементов, связанные с предшествующей эволюцией системы. Отличия найденных химических составов FF Aqr и V471 Tau возможно объясняются следующими причинами.

1. Современная масса главной компоненты V471 Tau ($f(M_1) = 0.83 M_{\odot}$ [27]) допускает синтез в ее ядре на стадии сверхгиганта элементов α -процесса до ^{24}Mg включительно, а также элементов s -процесса. Масса горячего субкарлика в FF Aqr ($M_1 = 0.41 M_{\odot}$ [6]) ограничивает предшествующий ядерный синтез только производством ^{12}C и ^{16}O , линии которых недоступны для корректного исследования в наблюдаемых спектрах. Для

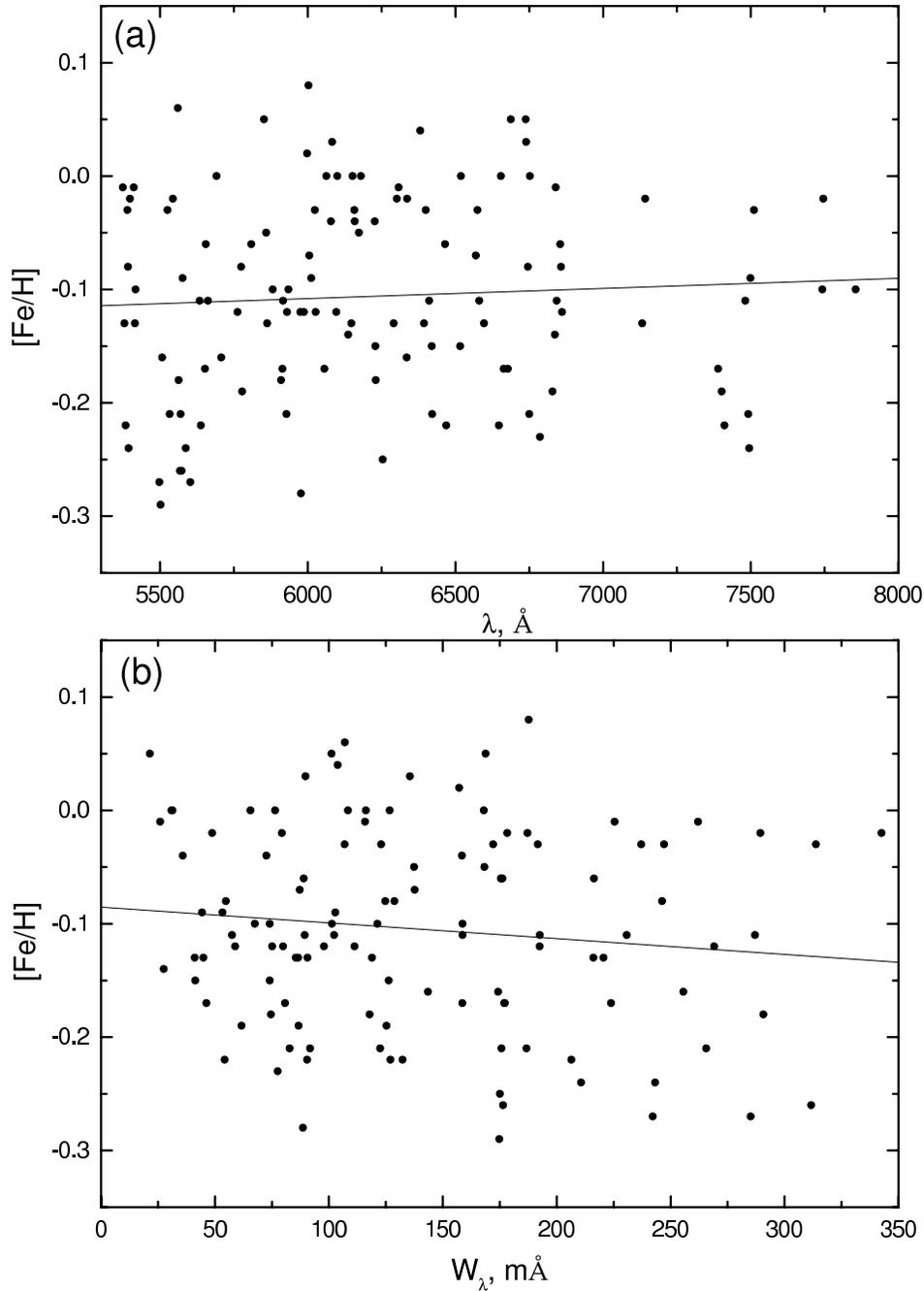


Рис. 6. Зависимости содержаний железа $[Fe/H]$, определенных по неблендированным линиям FeI , от их длины волны (а) и наблюдаемой эквивалентной ширины (б).

проверки существования избытков этих элементов необходимо получение на крупных телескопах спектров высокого разрешения с отношением сигнал/шум не менее $S/N > 200$, охватывающего весь оптический диапазон. Одновременно аналогичное исследование новых ПП позволит установить связь избытков содержаний различных химических элементов с массами главных компонент систем,

т.е. задать эмпирические ограничения на механизмы и темпы ядерного синтеза в их ядрах.

2. Соотношение большой полуоси $A = 3.30 R_\odot \pm 0.08 R_\odot$ и радиуса вторичной компоненты $R_2 = 0.96 R_\odot \pm 0.04 R_\odot$ [27] для V471 Tau указывает на непосредственный контакт последней с ядром главной компоненты ($R \approx 1.50 R_\odot$) во время прохождения системой стадии общей оболочки.

В результате в V471 Tau перенос вновь синтезированного вещества на поверхность холодной звезды протекал особенно эффективно и существенно изменил химический состав как ее атмосферы, так и глубоких слоев. Набор параметров FF Aqr ($A = 22.2 R_{\odot} \pm 2.0 R_{\odot}$, $R_2 = 6.9 R_{\odot} \pm 0.1 R_{\odot}$ [6]) предполагает, что в стадии общей оболочки ее вторичная компонента имела контакт только с внутренней конвективной зоной сверхгиганта. Поэтому на поверхность холодной звезды в основном аккрецировало вещество с первичным химическим составом (при некотором избытке гелия), что определило отсутствие наблюдаемых аномалий химических элементов. Другие тесные двойные системы с найденными ранее избытками элементов α -, r - и s -процессов имеют периоды изменений блеска $P_{\text{фот}} = 0.^d765$ у LW Нуа [2] и $P_{\text{фот}} = 5.^d913$ у IN Com [30]. Однако в последнем случае наблюдаемые изменения связываются с вращением холодной звезды с запятненной поверхностью, не синхронизированным с ее орбитальным движением. Полученные приблизительные оценки параметров LW Нуа ($M_1 = 0.5 M_{\odot}$ [31], $M_2 = 1.5 M_{\odot}$ [2]) и IN Com ($M_1 = 0.6 M_{\odot}$, $M_2 = 1.1 M_{\odot}$ [32]) указывают на наличие в стадии общей оболочки контакта ядер главных компонент с поверхностью их холодных спутников, обеспечившего обогащение последних продуктами ядерного синтеза. Таким образом, мы пришли к выводу об эффективности поиска аномалий химических элементов только в тесных двойных системах с большими полуосями менее $A = 6.0\text{--}8.0 R_{\odot}$, что соответствует орбитальным периодам $P_{\text{орб}} < 2.^d5$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при совместной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований и Правительства Республики Татарстан (проекты 09–02–97013–а, 10–02–01145–а). Авторы благодарны ТЮБИТАК и КФУ за частичную поддержку в использовании РТТ150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп, Анталья). Отдельную признательность мы выражаем А. И. Галееву за большую помощь при выполнении наблюдений и Н. А. Сахибуллину за полезные советы и конструктивное сотрудничество при анализе полученных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Martin, J. Pavlenko, and R. Rebolo, *Astronom. Zh.* **326**, 731 (1997).
2. F. Thevenin and G. Jasniewicz, *Astronom. and Astrophys.* **320**, 913 (1997).
3. Н. Н. Шиманская, В. В. Шиманский, И. Ф. Бикмаев и А. И. Галеев, *Кинематика и физика небесных тел* **26**, 304 (2009).
4. M. M. Dworetzky, H. H. Lanning, P. E. Etzel, and D. J. Patenaude, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **181**, 13 (1977).
5. E. Marilli, A. Frasca, M. B. Terra, and S. Catalano, *Astronom. and Astrophys.* **295**, 393 (1995).
6. T. R. Vaccaro and R. E. Wilson, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **342**, 564 (2003).
7. S. J. O'Toole, *Astronom. and Astrophys.* **423**, L. 25 (2004).
8. Г. А. Галазутдинов, Препринт САО РАН №92, 1 (1992).
9. N. E. Piskunov, in "Physics and evolution of stars", Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Nauka, Sankt-Petersburg, 1992), p. 92.
10. F. Castelli and R. L. Kurucz, *IAU Symp. № 210 Modelling of Stellar Atmospheres*, A20 (2003).
11. D. G. Yakovlev, L. M. Band, M. B. Trzhaskovskaya, and D. A. Verner, *Astronom. and Astrophys.* **237**, 267 (1990).
12. M. J. Seaton, C. J. Zeippen, J. A. Tully, et al., *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* **23**, 19 (1992).
13. R. L. Kurucz, *SAO CD-Roms* (Cambridge, MA02138, USA, 1994).
14. V. F. Suleymanov, *Astron. Astrophys. Trans.* **2**, 197 (1992).
15. E. Anders and N. Grevesse, *Geochimica et Cosmochimica Acta.* **53**, 197 (1989).
16. A. Ulla and P. Tejl, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **132**, 1 (1998).
17. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **141**, 371 (2000).
18. R. L. Kurucz and I. Furenlid, *SAO Special Rep.* **387**, 1 (1979).
19. A. Unsold, *Physik der Sternatmosphären* (Springer, Berlin–Gottingen–Heidelberg, 1955).
20. А. А. Радциг и Б. М. Смирнов, *Параметры атомов и атомных ионов* (Энергоатомиздат, Москва, 1986).
21. J. A. Johnson, *Astrophys. J. Suppl.* **139**, 219 (2002).
22. J. A. Johnson, I. I. Ivans, and P. B. Stetson, *Astrophys. J.* **640**, 801 (2006).
23. S. Castro, G. F. Porto de Mello, L. da Silva, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **305**, 693 (1999).
24. Л. И. Машонкина, В. В. Шиманский и Н. А. Сахибуллин, *Астрон. ж.* **77**, 893 (2000).
25. R. L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault, and L. Testerman, *Solar Flux Atlas from 296 to 1300nm*. (Nat. Solar Obs., Sunspot, New Mexico, 1984).
26. Д. В. Иванова, Н. А. Сахибуллин и В. В. Шиманский, *Астрон. ж.* **79**, 433 (2002).
27. M. Sean O'Brien, H. E. Bond, and E. M. Sion, *Astrophys. J.* **563**, 971 (2001).
28. I. J. Iben and A. Tutukov, *Astrophys. J.* **418**, 343 (1993).

29. В. В. Шиманский, Н. В. Борисов, С. А. Позднякова и др., Астрон. ж. **85**, 623 (2008). 434 (2002).
30. K. G. Strassmeier, B. Hubl, and J. B. Rice, *Astronom. and Astrophys.* **322**, 511 (1997). 32. G. Jasiewicz, F. Thevenin, R. Monier, and B. A. Skiff, *Astronom. and Astrophys.* **307**, 200 (1996).
31. J. E. Herald and L. Bianchi, *Astrophys. J.* **580**,

ANALYSIS OF THE FF AQR SPECTRA

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

We determine the atmospheric parameters of the secondary in the close binary system FF Aqr and analyze its chemical composition. A series of high-resolution spectra are taken at different orbital phases using the coude echelle spectrometer of the 1.5-m Russian–Turkish Telescope (RTT150). We show that the absorption line intensity of heavy elements varies with phase due to the spotty nature of the cool component. We determine the abundances of heavy elements in the star’s atmosphere by modelling the synthetic spectra and performing a differential analysis of the chemical composition of FF Aqr relative to the solar composition. Our analysis of the averaged spectrum of FF Aqr yielded 539 abundance estimates for 21 chemical elements. We found the metallicity of the star ($[Fe/H] = -0.11 \pm 0.08$) to be close solar, in agreement with the hypothesis that FF Aqr should belong to the Galactic disk. The inferred chemical composition of the objects exhibits no anomalous abundances of the α -, r -, and s -process elements like those earlier found in other systems (IN Com, LW Hya, V471 Tau). The lack of such anomalies in FF Aqr must be due to the fact that the elements heavier than ^{16}O cannot be synthesized in the core of the primary during the last stages of its evolution.

Key words: *stars: binaries—stars: variables—stars: individual: FF Aqr*