

УДК 524.38-355

## АНАЛИЗ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ V837 TAU — ЗВЕЗДЫ ТИПА RS CVn

© 2019 А. И. Колбин<sup>1\*</sup>, В. В. Шиманский<sup>1</sup>, И. Ю. Алексеев<sup>2</sup>,  
Н. Н. Шиманская<sup>1</sup>, М. М. Габдеев<sup>3</sup>, В. В. Цымбал<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

<sup>2</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

<sup>3</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>4</sup>Крымский федеральный университет, Симферополь, 295007 Россия

Поступила в редакцию 4 июля 2018 года; после доработки 4 апреля 2019 года; принята к публикации 4 апреля 2019 года

В работе выполнен анализ спектров звезды V837 Tau, принадлежащей к классу хромосферно-активных звезд типа RS CVn. Наблюдательный материал был получен на Российско-Турецком телескопе РТТ-150 и телескопе ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории. Для выявления признаков фотосферной запятненности главного компонента и выделения слабого вторичного компонента проведена деконволюция «усредненного» спектрального профиля системы. Путем описания кривых лучевых скоростей уточнены элементы орбиты двойной системы, а методом моделирования спектров определены фундаментальные параметры компонентов, а также химический состав атмосферы яркого компонента. При помощи метода доплеровского картирования восстановлено распределение пятен по поверхности яркой звезды. Показано, что пятна концентрируются в поясе на средних (около 40°) широтах. Профили водородных линий имеют переменную эмиссионную составляющую яркого компонента, а в линии H $\alpha$  обнаруживаются признаки хромосферной активности вторичного компонента.

Ключевые слова: *звезды: двойные — звезды: индивидуальные: V837 Tau*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Переменные звезды типа RS CVn представляют собой двойные системы, первичный компонент которых является гигантом или субгигантом спектральных классов F-K, а вторичный — G-M-карликом Главной последовательности. Из-за приливной синхронизации вращательного и орбитального периодов компоненты этих систем имеют большие скорости вращения  $v_{\text{eq}} = 10\text{--}100 \text{ км с}^{-1}$ . Быстрое вращение звезд данного типа определяет высокую магнитную активность, которая поддерживается механизмом магнитного динамо. Выходящие на поверхность звезды магнитные трубки образуют крупные темные фотосферные пятна, аналогичные солнечным. В ходе вращения звезды пятна периодически появляются на наблюдаемом диске и заходят за него. По мере прохождения пятен по диску изменяется их телесный угол и интенсивность излучения в направлении наблюдателя, что приводит к внезапным вращательно-модулированным изменениям блеска ( $\Delta V \sim 0^{\text{m}}1$ ) звезд типа RS CVn. Благодаря

изменению лучевой скорости пятен в профилях фотосферных спектральных линий образуются особенности — «квазиэмиссии» или «квазиабсорбции», перемещающиеся с синего крыла линии в красное. Положение этих особенностей связано с распределением пятен по поверхности звезды, и их изучение позволяет восстановить карты звездной поверхности методом доплеровского картирования. Хромосферная магнитная активность в оптическом диапазоне проявляется в виде эмиссий в линиях Ca II H и K, а также в водородных линиях бальмеровской серии, которые образуются благодаря нерадиативным магнитогидродинамическим процессам. Среди других признаков магнитной активности звезд типа RS CVn назовем хромосферные вспышки, корональное рентгеновское и микроволновое излучение. Изучение магнитной активности звезд типа RS CVn актуально для понимания работы механизма звездного динамо и эволюции звездных магнитных полей. Ввиду высокой светимости звезды типа RS CVn являются основными кандидатами для детального изучения фотосферной запятненности на основе спектральных наблюдений.

\*E-mail: kolbinalalexander@mail.ru

В настоящей работе проведен анализ спек-

трального материала переменной типа RS CVn V837 Tau ≡ HD 22403. Двойственность этой звезды была обнаружена Хердом [1], который классифицировал ее как спектрально-двойную класса SB1 с амплитудой лучевой скорости первичного компонента  $150 \text{ км с}^{-1}$  и определил ее спектральный класс G2V. Спектральные наблюдения [2] позволили определить орбитальный период  $P_{\text{orb}} = 1^{\text{d}}9299$  с указанием на эксцентриситет орбиты  $e = 0.035 \pm \pm 0.02$ . В исследовании [3] была обнаружена фотометрическая переменность V837 Tau, обусловленная прохождением пятен по диску звезды. Амплитуда переменности составила  $\Delta V \sim 0^{\text{m}}09$ , а ее период оказался близким к орбитальному. Наиболее детальное спектральное исследование этой звезды выполнено Стоктоном и Фекелом [4]. Им удалось обнаружить линии вторичного компонента в красном участке видимого спектра, что позволило сделать оценку отношения масс компонентов системы  $M_2/M_1 = 0.673 \pm 0.052$  (здесь и далее индекс 1 соответствует первичному компоненту, а индекс 2 — вторичному). Анализ ширины спектральных линий дал значения проекции скоростей экваториального вращения  $v \sin i = 31 \pm 2$  и  $23 \pm 4 \text{ км с}^{-1}$  для первичного и вторичного компонентов соответственно. Детальное изучение магнитной активности V837 Tau до настоящего времени не проводилось, что побудило нас сосредоточить внимание на анализе ее проявлений в фотосфере и хромосфере данной звезды. Помимо этого мы уточнили орбитальные параметры системы и параметры ее компонентов, а также выполнили анализ химического состава первичного компонента.

В разделе 2 настоящей работы мы описываем выполненные спектроскопические наблюдения V837 Tau и методику обработки полученного материала. В разделе 3 обсуждается «усреднение» спектральных линий на основе метода LSD, необходимого для обнаружения слабого вторич-

ного компонента и эффектов запятненности. Следующий раздел посвящен определению параметров орбиты V837 Tau путем моделирования кривых лучевых скоростей. Далее определяются фундаментальные параметры компонентов системы на основе фотометрических данных и моделирования спектров. Отдельный раздел посвящен анализу химического состава атмосферы яркого компонента. В разделе 7 описывается реализованный нами метод доплеровского картирования холодных запятненных звезд и обсуждаются результаты его применения к V837 Tau. Далее проводится анализ хромосферной эмиссии, наблюдаемой в линиях H $\alpha$  и H $\beta$ . В Заключении формулируются результаты проведенного исследования.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Спектроскопические наблюдения V837 Tau выполнялись на 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150 (Турецкая национальная обсерватория TÜBİTAK). Наблюдениями был охвачен период с сентября 2013 г. по январь 2014 г. Регистрация спектров проводилась с применением куде-эшелле спектрографа высокого разрешения CES ( $R = \lambda/\Delta\lambda \approx 40\,000$ , диапазон 4000–7500 Å), оснащенного ПЗС-матрицей Andor’s iKon-DW436 (2k × 2k пиксел) с термоэлектронным охлаждением. Дополнительные спектроскопические наблюдения были проведены в ноябре 2013 г.—феврале 2014 г. (восемь ночей) на на 2.6-м телескопе ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории при помощи эшелле-спектрографа с разрешением  $R \approx 20\,000$ . Спектральные порядки регистрировались с помощью матрицы Andor’s iKon-L936 (2K × 2K пиксел) с Пельтье-охлаждением. Все наблюдения выполнены при хороших астроклиматических условиях с размером звездного изображения 1''–1.5''. Журнал спектральных наблюдений представлен в таблице 1.

**Таблица 1.** Журнал спектроскопических наблюдений V837 Tau. Представлены гелиоцентрические юлианские даты середины экспозиции, лучевые скорости первичного и вторичного компонентов с учетом гелиоцентрической поправки

| Номер | Телескоп | Дата         | HJD 2456000+ | $RV_1, \text{ км с}^{-1}$ | $\sigma_{RV1}$ | $RV_2, \text{ км с}^{-1}$ | $\sigma_{RV2}$ |
|-------|----------|--------------|--------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| 1     | 2        | 3            | 4            | 5                         | 6              | 7                         | 8              |
| 1     | РТТ      | Oct 24, 2013 | 590.22443    | 16.76                     | 0.33           | −65.72                    | 0.46           |
| 2     | РТТ      | Oct 24, 2013 | 590.24697    | 22.01                     | 0.35           | −73.13                    | 0.50           |
| 3     | РТТ      | Oct 26, 2013 | 591.39776    | −88.18                    | 0.36           | 85.52                     | 0.56           |
| 4     | РТТ      | Oct 26, 2013 | 591.42030    | −89.93                    | 0.39           | 89.02                     | 0.50           |
| 5     | РТТ      | Oct 26, 2013 | 592.29773    | 43.46                     | 0.38           | −110.41                   | 0.43           |
| 6     | РТТ      | Oct 26, 2013 | 592.32029    | 46.57                     | 0.33           | −114.67                   | 0.32           |
| 7     | РТТ      | Oct 26, 2013 | 592.34351    | 49.74                     | 0.34           | −119.40                   | 0.49           |

Таблица 1. (Продолжение)

| Номер | Телескоп | Дата         | HJD 2456000+ | $RV_1$ , км с <sup>-1</sup> | $\sigma_{RV1}$ | $RV_2$ , км с <sup>-1</sup> | $\sigma_{RV2}$ |
|-------|----------|--------------|--------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| 1     | 2        | 3            | 4            | 5                           | 6              | 7                           | 8              |
| 8     | RTT      | Oct 27, 2013 | 593.23658    | -67.58                      | 0.34           | 59.38                       | 0.28           |
| 9     | RTT      | Oct 27, 2013 | 593.25912    | -71.96                      | 0.23           | 64.25                       | 0.27           |
| 10    | RTT      | Oct 27, 2013 | 593.28167    | -75.79                      | 0.40           | 69.13                       | 0.25           |
| 11    | RTT      | Oct 27, 2013 | 593.30422    | -79.32                      | 0.40           | 73.66                       | 0.30           |
| 12    | RTT      | Oct 27, 2013 | 593.32677    | -82.96                      | 0.38           | 77.67                       | 0.30           |
| 13    | RTT      | Oct 27, 2013 | 593.34931    | -85.83                      | 0.39           | 82.29                       | 0.40           |
| 14    | RTT      | Oct 27, 2013 | 593.37186    | -88.45                      | 0.42           | 86.48                       | 0.36           |
| 15    | RTT      | Oct 27, 2013 | 593.39441    | -90.59                      | 0.45           | 90.30                       | 0.21           |
| 16    | RTT      | Oct 27, 2013 | 593.41695    | -92.41                      | 0.41           | 93.04                       | 0.51           |
| 17    | RTT      | Oct 28, 2013 | 593.43950    | -93.60                      | 0.44           | 95.17                       | 0.31           |
| 18    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.20862    | 32.60                       | 0.37           | -91.23                      | 0.35           |
| 19    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.23117    | 37.17                       | 0.35           | -100.67                     | 0.41           |
| 20    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.25373    | 41.03                       | 0.36           | -106.65                     | 0.30           |
| 21    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.27629    | 44.47                       | 0.38           | -112.02                     | 0.42           |
| 22    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.29884    | 47.53                       | 0.36           | -116.65                     | 0.43           |
| 23    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.32140    | 50.40                       | 0.34           | -120.28                     | 0.37           |
| 24    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.34396    | 52.62                       | 0.32           | -123.88                     | 0.25           |
| 25    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.36651    | 54.92                       | 0.32           | -126.29                     | 0.34           |
| 26    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.38907    | 56.29                       | 0.35           | -128.99                     | 0.38           |
| 27    | RTT      | Oct 28, 2013 | 594.41163    | 57.81                       | 0.34           | -130.21                     | 0.27           |
| 28    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.21907    | -77.10                      | 0.38           | 69.83                       | 0.35           |
| 29    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.24163    | -80.37                      | 0.37           | 74.86                       | 0.33           |
| 30    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.26419    | -83.76                      | 0.40           | 79.85                       | 0.49           |
| 31    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.28673    | -86.49                      | 0.41           | 84.74                       | 0.50           |
| 32    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.30928    | -89.10                      | 0.42           | 88.30                       | 0.38           |
| 33    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.33183    | -91.03                      | 0.40           | 91.50                       | 0.46           |
| 34    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.35439    | -92.64                      | 0.43           | 94.53                       | 0.51           |
| 35    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.37695    | -94.15                      | 0.42           | 96.40                       | 0.41           |
| 36    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.39950    | -94.83                      | 0.43           | 98.11                       | 0.41           |
| 37    | RTT      | Oct 29, 2013 | 595.42205    | -95.40                      | 0.44           | 98.37                       | 0.49           |
| 38    | RTT      | Jan 09, 2014 | 667.09253    | -70.55                      | 0.39           | 64.34                       | 0.61           |
| 39    | RTT      | Jan 09, 2014 | 667.11743    | -65.61                      | 0.41           | 55.87                       | 0.40           |
| 40    | RTT      | Jan 09, 2014 | 667.14001    | -60.99                      | 0.42           | 48.97                       | 0.36           |
| 41    | RTT      | Jan 09, 2014 | 667.16914    | -54.67                      | 0.47           | 37.69                       | 0.29           |
| 42    | RTT      | Jan 10, 2014 | 668.08660    | 30.04                       | 0.31           | -84.80                      | 0.31           |
| 43    | RTT      | Jan 10, 2014 | 668.10918    | 25.29                       | 0.35           | -78.91                      | 0.51           |
| 44    | RTT      | Jan 10, 2014 | 668.13249    | 20.21                       | 0.33           | -71.35                      | 0.42           |

Таблица 1. (Продолжение)

| Номер | Телескоп | Дата         | HJD 2456000+ | $RV_1$ , км с <sup>-1</sup> | $\sigma_{RV1}$ | $RV_2$ , км с <sup>-1</sup> | $\sigma_{RV2}$ |
|-------|----------|--------------|--------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| 1     | 2        | 3            | 4            | 5                           | 6              | 7                           | 8              |
| 45    | RTT      | Jan 11, 2014 | 669.13689    | -46.73                      | 0.40           | 24.05                       | 0.43           |
| 46    | RTT      | Jan 11, 2014 | 669.15947    | -40.99                      | 0.35           | 14.17                       | 0.66           |
| 47    | RTT      | Jan 14, 2014 | 672.38657    | -71.51                      | 0.43           | 66.24                       | 0.81           |
| 48    | RTT      | Jan 14, 2014 | 672.40915    | -75.60                      | 0.42           | 73.25                       | 0.75           |
| 49    | ZTS      | Feb 11, 2014 | 700.18825    | -20.66                      | 0.40           | —                           | —              |
| 50    | ZTS      | Feb 11, 2014 | 700.20311    | -17.01                      | 0.25           | —                           | —              |
| 51    | ZTS      | Feb 11, 2014 | 700.22406    | -12.93                      | 0.12           | —                           | —              |
| 52    | ZTS      | Feb 13, 2014 | 702.21557    | 0.04                        | 0.42           | —                           | —              |
| 53    | ZTS      | Feb 13, 2014 | 702.23053    | 4.49                        | 0.32           | —                           | —              |
| 54    | ZTS      | Feb 13, 2014 | 702.24831    | 8.07                        | 0.33           | -50.52                      | 0.41           |

Обработка наблюдательного материала проводилась в автоматическом режиме при помощи разработанного нами программного комплекса EXTRACT-RTT<sup>1</sup>. Данный комплекс позволяет выполнять все стандартные процедуры, необходимые для корректной экстракции спектров. Сначала из изображений вычитался «электронный ноль» (bias) и удалялись следы космических частиц с помощью простого эвристического анализатора. Затем проводилась экстракция спектральных порядков с вычитанием рассеянного света. Для учета неоднородности чувствительности пикселей матрицы и удаления фрингов выполнялась аппроксимация спектров лампы плоского поля полиномом низкой степени. Путем деления спектров «плоского поля» на аппроксимирующий полином были получены распределения чувствительности, на которые делились спектры объекта. Калибровка по длинам волн проводилась с помощью спектров лампы «торий—аргон». После выполнения отождествления реперов на порядках калибровочной лампы программа строила двумерную полиномиальную аппроксимацию зависимости длины волны от номера пикселя и номера порядка с отбрасыванием сильно отклоняющихся точек. Для каждого спектра находились гелиоцентрические поправки, используемые далее для вычисления лучевых скоростей компонентов V837 Tau.

Экстрагированные спектры звезды  $F(n, l)$  (здесь  $n$  — номер спектрального порядка,  $l$  — номер длины волны в спектральном порядке) были нормированы на континуум. Континуум моделировался двумерным полиномом  $P(n, l)$ , коэффи-

циенты которого определялись таким образом, чтобы достигалось максимальное согласование нормированного наблюдаемого спектра с теоретическим. Для этого проводилась минимизация суммы взвешенных квадратов невязок

$$\sum_n \sum_l \frac{1}{F(n, l)} (P(n, l)r'(n, l) - F(n, l))^2, \quad (1)$$

где  $r'(n, l)$  — теоретическая остаточная интенсивность, рассчитанная для длины волны, соответствующей параметрам  $n$  и  $l$ . Выбор весов  $1/F(n, l)$  сделан в предположении пуассоновского распределения шумов. Модельный спектр смещался в соответствии с лучевой скоростью первичного компонента, оцениваемой путем кросс-корреляционного анализа отдельных, предварительно нормированных спектральных порядков с теоретическим спектром. При построении полинома  $P(n, l)$  исключались области, занятые теллурическими и водородными линиями, а также области высоких невязок, которые определялись визуально.

Теоретические спектры  $r'(n, l)$  рассчитывались при помощи программы SynthV [5] на моделях атмосфер LLmodels [6] с использованием атомных параметров базы VALD3 [7, 8]. Вычисления проводились для эффективной температуры  $T_{\text{eff}} = 5600$  К, ускорения силы тяжести  $\lg g = 4.0$  в предположении солнечного химического состава  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ . Учитывалось вращательное уширение линий для  $v \sin i = 31$  км с<sup>-1</sup> [4] и инструментальное уширение. Вклад излучения вторичного компонента V837 Tau считался пренебрежимо малым.

### 3. LSD-АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Полученные спектры V837 Tau имеют низкое отношение  $S/N$ , недостаточное для анализа

<sup>1</sup>Код использованного в работе программного комплекса автоматической обработки эшелле-спектров доступен по адресу <https://github.com/arneb89/EXTRACT-RTT>.

эффектов запятненности. Однако регистрация спектров проводилась в широком спектральном диапазоне, охватывающем большое количество спектральных линий. Используя метод LSD (Least Square Deconvolution) [9] можно восстановить «усредненный» спектральный профиль по большому количеству достаточно сильных наблюдаемых спектральных линий, который будет иметь  $S/N$  в десятки раз больше по сравнению с исходным спектром. В основе метода LSD лежит предположение, что все рассматриваемые линии имеют одну и ту же форму, определяемую LSD-профилем. Наблюдаемый спектр можно представить в виде конволюции LSD-профиля и набора  $\delta$ -функций, длина волны и высота которых соответствуют положениям и глубине спектральных линий. Восстановление усредненного профиля представляет собой линейную обратную задачу, которая может быть сведена к решению системы линейных уравнений.

Для определения глубин и положения линий мы использовали модель атмосферы LLmodels [6], рассчитанную для температуры  $T_{\text{eff}} = 5600$  К,  $\lg g = 4.0$ ,  $\xi_{\text{turb}} = 2$  км с<sup>-1</sup> с солнечным химическим составом. На данной модели проводилось решение уравнения переноса с использованием программы SynthV [5] с целью расчета теоретического спектра. Необходимые для вычислений атомные данные были взяты из базы данных VALD 3 [7, 8].

Расчет LSD-профиля осуществлялся при помощи программного кода [10], позволяющего выполнять восстановление индивидуальных профилей для каждого компонента двойной системы. Вычисление профиля проводилось два раза. При первой итерации использовались глубины линий, найденные путем моделирования спектров. После этого выполнялась процедура корректировки найденных значений путем сравнения построенного из LSD-профилей спектра с наблюдаемым. Таким образом уменьшались ошибки, связанные с неточным знанием фундаментальных параметров звезды. Уточненные глубины линий использовались во второй итерации для получения окончательного профиля. При вычислении профиля на основе данных РТТ-150 использовались линии, лежащие в диапазоне от 4500 до 6500 Å, при анализе данных ЗТШ брался диапазон от 4000 до 5000 Å. В обоих случаях исключались области, покрываемые теллурическими линиями, а также линиями  $\text{H}\alpha$ ,  $\text{H}\beta$  и дублета натрия  $\text{Na I } 5896, 5890$ . Краевые области спектральных порядков, имеющие низкое  $S/N$ , также исключались из LSD-анализа.

Пример восстановленного LSD-спектра показан на рис. 1. В нем обнаруживаются два профиля: глубокий, соответствующий первичному компо-

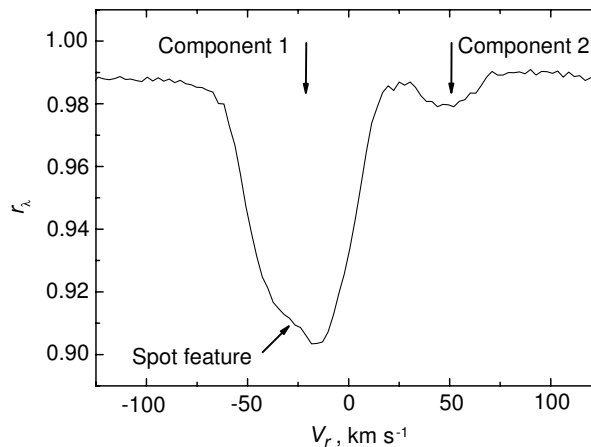


Рис. 1. Пример восстановленного LSD-спектра V837 Tau. Видны профили первичного и вторичного компонентов, а также «квазиэмиссия» в профиле первичного компонента, вызванная пятном на поверхности звезды.

ненту, и менее интенсивный, образуемый вторичным компонентом. В профиле яркого компонента имеется искажение («квазиэмиссия»), образуемое пятнами.

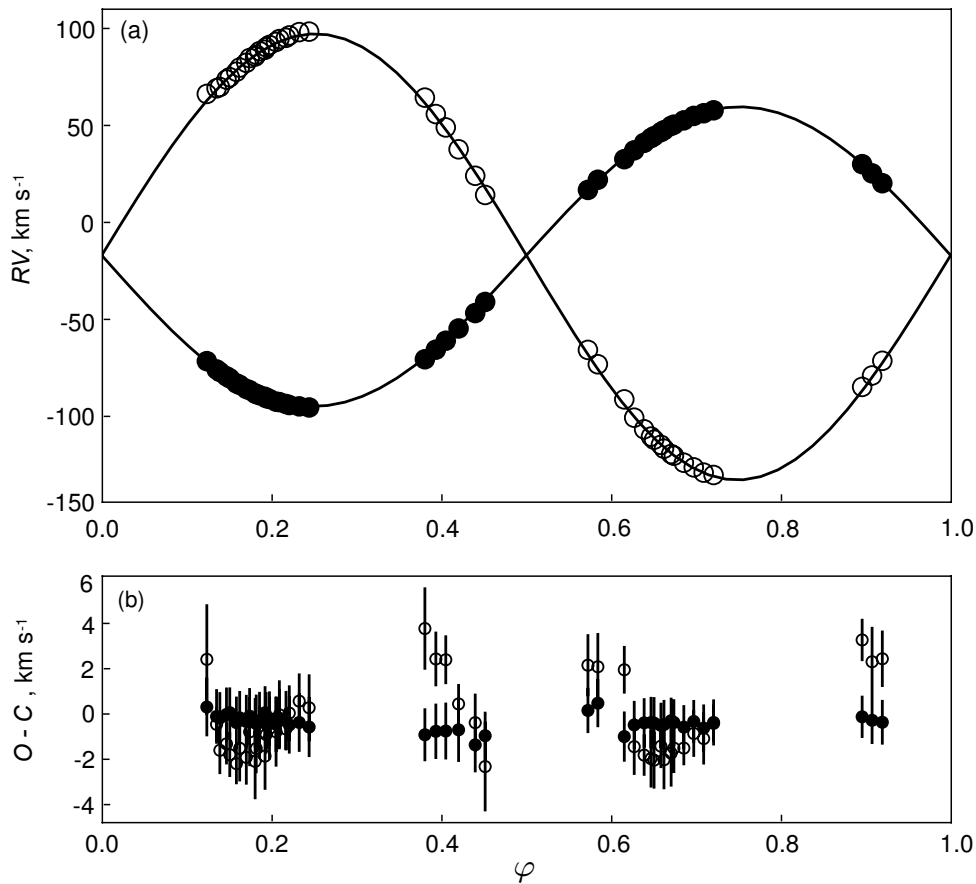
#### 4. КРИВЫЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ И ОРБИТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Лучевые скорости компонентов V837 Tau находились путем аппроксимации LSD-профилей гауссианами со средними ошибками определения центров линий  $\sigma_{V1} = 0.36$  км с<sup>-1</sup> и  $\sigma_{V2} = 0.41$  км с<sup>-1</sup> для первичного и вторичного компонентов соответственно. Полученные таким способом кривые лучевых скоростей изображены на рис. 2, а найденные значения лучевых скоростей приведены в таблице 1.

Описание наблюдаемых кривых лучевых скоростей проводилось при помощи модели эксцентрической орбиты. Определение параметров орбиты (лучевой скорости центра масс  $\gamma$ , полуамплитуд лучевых скоростей компонентов  $K_1$  и  $K_2$ , эксцентриситета  $e$ , долготы периастра  $\omega$  и времени прохождения периастра  $T_0$ ) выполнялось путем минимизации взвешенной суммы квадратов невязок между наблюдаемыми и модельными скоростями:

$$\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} (V_i^1 - V(\gamma, K_1, e, \omega, T_0, \varphi_i))^2 + \frac{1}{\sigma_i^2} (V_i^2 - V(\gamma, K_2, e, \omega + \pi, T_0 + P_{\text{orb}}/2, \varphi_i))^2. \quad (2)$$

Оптимизация последней функции проводилась методом Нелдера–Мида. Использована оценка орбитального периода звезды  $P_{\text{orb}} = 1^{\text{d}}9299275$  [4], полученная по гораздо более продолжительному



**Рис. 2.** Кривые лучевых скоростей первичного (заполненные) и вторичного (пустые кружки) компонентов V837 Тау, а также их описание полученной моделью орбиты (сплошные линии) (a) и соответствующий график  $O - C$  (b).

ряду наблюдений. Средняя ошибка описания лучевых скоростей составила  $0.33$  и  $1.69 \text{ км с}^{-1}$  для главного и вторичного компонентов соответственно. Точность полученных параметров орбиты оценивалась методом Монте-Карло в предположении нормального распределения ошибок лучевых скоростей (за ошибку принималась величина  $1\sigma$ ). Найденные параметры орбиты V837 Тау перечислены в таблице 2, а сравнение теоретической кривой лучевых скоростей с наблюдаемой дано на рис. 2. Отметим, что полученные нами параметры хорошо согласуются с результатами работы [4], однако имеют бóльшую точность. Заметим также, что, согласно нашим вычислениям, орбита имеет небольшой эксцентриситет  $e = 0.006 \pm 0.002$ , что не было зарегистрировано ранее [4]. С другой стороны, в работе [2] указан гораздо больший эксцентриситет  $e = 0.035$ , вероятно, обусловленный ошибками измерений.

### 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ

Сначала оценка температуры яркого компонента V837 Тау выполнялась по имеющимся в

**Таблица 2.** Орбитальное решение для V837 Тау

| Параметр                   | Значение  | Ошибка   |
|----------------------------|-----------|----------|
| $P$ , сутки                | 1.9299275 | 0.000006 |
| $K_1$ , км с $^{-1}$       | 77.22     | 0.10     |
| $K_2$ , км с $^{-1}$       | 115.02    | 0.29     |
| $\gamma$ , км с $^{-1}$    | -17.33    | 0.08     |
| $e$                        | 0.006     | 0.002    |
| $\omega^\circ$             | -49       | 50       |
| $q = M_1/M_2$              | 1.489     | 0.007    |
| $a_1 \sin i$ , a.e.        | 0.01370   | 0.00003  |
| $a_2 \sin i$ , a.e.        | 0.02040   | 0.00008  |
| $a \sin i$ , a.e.          | 0.03410   | 0.00009  |
| $M_1 \sin^3 i$ , $M_\odot$ | 0.852     | 0.008    |
| $M_2 \sin^3 i$ , $M_\odot$ | 0.572     | 0.003    |
| $f(M)_1$ , $M_\odot$       | 0.0922    | 0.0005   |
| $f(M)_2$ , $M_\odot$       | 0.3048    | 0.004    |

литературе фотометрическим данным. Мы использовали значения цветов  $B - V = 0^m70 \pm 0.01$  [3],  $V - I = 0^m75$  [11] фотометрической системы Джонсона, а также цвет  $b - y = 0^m443 \pm 0.01$  [12] фотометрической системы Стремгрена. При первой итерации температура яркого компонента определялась в предположении пренебрежимо малого вклада его соседа. Перевод цветов в эффективную температуру осуществлялся путем интерполяции сетки теоретических показателей цвета [13]. Оценки ускорения силы тяжести и металличности, необходимые для определения температуры, были заимствованы из статьи [14]:  $\lg g = 4.12$  и  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.16$ . Средневзвешенная температура по данным трех цветов оказалась следующей:  $T = 5614 \pm 64$  К (в качестве весов использовались обратные отклонения от среднего).

По видимому блеску  $V = 7^m28$  [15] и параллаксу  $p = 0''.0269 \pm 0.00056$  [16] определена абсолютная звездная величина  $M_V$ , с которой был рассчитан радиус звезды  $R$ :

$$\lg \frac{R}{R_\odot} = 0.2((m^0 - m_\odot^0) - (M_V - M_{V_\odot})), \quad (3)$$

где  $M_V - M_{V_\odot}$  — разность абсолютных звездных величин исследуемой звезды и Солнца ( $M_{V_\odot} = 4^m83$ ), а  $m^0 - m_\odot^0 = -2.5 \lg(F^0/F_\odot^0)$ , где под логарифмом стоит отношение потоков излучения от единичных площадок на поверхности звезды и Солнца. Величина  $m^0 - m_\odot^0$  определялась при помощи интерполяции таблиц Куруца [17]. Параметры атмосферы Солнца приняты равными  $T_{\text{eff}}^\odot = 5777$  К и  $\lg g_\odot = 4.44$ . Полученные по формуле (3) радиус и светимость звезды равны  $R = 1.29 \pm 0.07 R_\odot$  и  $L = 1.49 \pm 0.14 L_\odot$ .

Определив светимость и температуру, мы сделали оценку массы и возраста звезды при помощи теоретических изохрон PARSEC [18]. Учитывая известное отношение масс компонентов  $q$  и принимая, что их возраст одинаков, по изохронам мы нашли температуру вторичного компонента, а также отношение радиусов компонентов  $R_2/R_1$ . После этого определение температуры, радиуса и массы первичного компонента выполнялось заново, однако с исправленными показателями цвета  $(m_A - m_B)^{(1)}$  и блеском  $m^{(1)}$ , для определения которых использовались формулы:

$$(m_A - m_B)^{(1)} = (m_A - m_B) + 2.5 \lg \left( \frac{1 + F_A^{(2)} R_2^2 / F_A^{(1)} R_1^2}{1 + F_B^{(2)} R_2^2 / F_B^{(1)} R_1^2} \right), \quad (4)$$

$$m^{(1)} = m^{(1+2)} + 2.5 \lg \left( 1 + \frac{F^{(2)} R_2^2}{F^{(1)} R_1^2} \right), \quad (5)$$

где  $m$  и  $(m_A - m_B)$  — блеск и показатель цвета системы соответственно, а вторые члены правой части уравнений — поправка, обусловленная наличием вторичного компонента. В состав поправочных членов входят отношения потоков у поверхности первичного и вторичного компонентов  $F_{A,B}^{(1,2)} / F_{A,B}^{(1,2)}$  (в формуле (4) с индексами  $A$  и  $B$ , соответствующими первому и второму фильтру), которые находились интерполяцией таблиц Куруца [17]. Полученная таким образом температура первичного компонента  $T_{\text{eff}} = 5730 \pm 100$  К. Поправка к светимости первичного компонента оказалась равной  $\Delta V = 0^m038$ , а уточненные значения его радиуса и светимости  $R/R_\odot = 1.21 \pm 0.08$  и  $L/L_\odot = 1.41 \pm 0.13$ .

Определение фундаментальных параметров яркого компонента V837 Tau также проводилось методом моделирования синтетических спектров и их согласования с наблюдаемыми. Для увеличения отношения  $S/N$  мы провели усреднение спектров, полученных на телескопе РТТ-150, переведя их в единую лабораторную шкалу длин волн с учетом найденных лучевых скоростей первичного компонента. В результате спектральные линии от главного компонента не испытывали дополнительного уширения, связанного с его орбитальным движением, а для вторичного компонента они уширялись за счет доплеровских сдвигов с суммарной амплитудой  $K = 192$  км с<sup>-1</sup> орбитального движения обоих компонентов. Моделирование спектров V837 Tau проводилось с использованием программного комплекса SYSTEM [19], являющегося расширением программы STAR [20] для исследований излучения спектрально-двойных систем с оптическими компонентами.

Спектр каждого компонента рассчитывался отдельно при решении уравнения переноса на равномерной сетке частот с применением гидростатических плоскопараллельных ЛТР-моделей Каstellи и Куруца [21], всех источников непрерывного поглощения, учитываемых в комплексе SPECTR [22], около 600 000 атомарных и 2 000 000 молекулярных линий из списков Каstellи и Куруца [21] и ряда сложных молекулярных полос, согласно данным Нерсисян и др. [23]. Для расчета водородных линий использовалась теория Вайдл—Куппер—Смитта [24]. Для остальных линий учитывалось доплеровское уширение от теплового движения и макротурбуленции со скоростью  $\xi_{\text{turb}}$ , естественное затухание, штарковское и ван-дер-ваальсовское уширение по формулам Куруца и Фюренлида [25] и Унзольда [26] с масштабирующим фактором  $\Delta \lg C_6 = 0.7$ . Для линий ряда атомов и ионов (H I, Na I, Mg I, Mg II, Ca II) выполнен прямой учет отклонений от ЛТР путем импорта по методике Шиманского и др. [27] не-ЛТР

населенностей их энергетических уровней, предварительно вычисленных с помощью комплекса NONLTE3 [28] на основе оригинальных моделей атомов. Солнечная шкала содержаний химических элементов принята согласно данным Андерса и Гревесса [29].

Рассчитанные спектры компонентов уширились, исходя из найденной по наблюдениям скорости их вращения, и складывались с учетом предполагаемых оценок радиуса. Для вторичного компонента дополнительно учитывалось искусственное уширение орбитальным движением, обусловленное методикой сложения наблюдаемых спектров (см. выше). Моделирование спектров проводилось с варьированием параметров первичного компонента, а параметры вторичного компонента были фиксированы и равны найденным значениям. Было получено, что вклад вторичного компонента в полное излучение системы никогда не превосходит 2% даже в наиболее красном диапазоне. Мы пришли к выводу о том, что параметры вторичного компонента не могут быть найдены из анализа наблюдаемого спектра (из-за сильного искусственного уширения), и в итоге для дальнейшего моделирования приняли полученный выше набор параметров и считали его неизменным.

Для определения эффективной температуры  $T_{\text{eff}}$ , индекса металличности  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , скоростей микротурбулентности  $\xi_{\text{turb}}$  и вращения  $v \sin i$  главного компонента анализировался спектральный диапазон 5000–6600 Å (за исключением участков с теллурическими линиями, ядрами линий  $\text{H}\alpha$  и дублета натрия  $\text{NaI}$  5896, 5890). Отметим, что одновременно контролировалась корректность выбранного значения поверхностной силы тяжести  $\lg g$ , но без определения  $\lg g$  путем наилучшего описания наблюдаемого спектра. Причины такого подхода будут названы далее. Кроме того, с полученными предварительными параметрами атмосферы определялся ее химический состав (см. ниже), после чего параметры были уточнены. Согласование теоретического и наблюдаемого спектров проводилось итерационно путем минимизации квадратов невязок. При каждой итерации строились поверхности среднеквадратичных отклонений теоретического и наблюдаемого спектров на сетках значений двух любых параметров главного компонента ( $T_{\text{eff}}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ,  $\xi_{\text{turb}}$ ,  $v \sin i$ ). Найденное для данной поверхности значение локального минимума использовалось для построения поверхности на сетках других параметров. Процесс поиска глобального минимума проводился на широкой сети параметров. В итоге лучшего согласия между наблюдаемым и теоретическим спектрами удалось достигнуть для  $T_{\text{eff}} = 5720 \pm 70$  К,

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -0.16 \pm 0.09, \quad \xi_{\text{turb}} = 1.2 \pm 0.1 \text{ км с}^{-1} \text{ и} \\ v \sin i = 35 \pm 1.5 \text{ км с}^{-1}.$$

Полученная по спектрам эффективная температура хорошо согласуется со значением, найденным фотометрическим методом. Определение ускорения силы тяжести изначально проводилось по крыльям линий дублета натрия  $\text{NaI}$  5896, 5890 и триплета магния  $\text{MgI}$  5165, 5172, 5183. Однако выяснилось, что определение  $\lg g$  по анализу крыльев линий в эшелле-спектрах не является корректной задачей, т.к. зависит от точности проведения континуума. Верхняя оценка  $\lg g$  может быть найдена по минимально допустимому значению радиуса  $R_{\text{min}} = 1.34 R_{\odot}$ . Значение  $R_{\text{min}}$  может быть получено исходя из оценки скорости вращения  $v \sin i$  в предположении, что  $i = 90^{\circ}$ . Определив светимость звезды для данного радиуса, по теоретическим изохронам [18] мы нашли граничное значение ускорения силы тяжести  $\lg g_{\text{max}} = 4.16$ . Нижняя граница  $\lg g$  найдена по нижней оценке массы звезды  $M \sin^3 i = 0.852 M_{\odot}$  и верхней границе ее радиуса, вычисленного по формуле (3). Необходимый для оценки радиуса блеск был принят равным  $V = 7^{\text{m}}28$  [15] за вычетом  $0^{\text{m}}3$  на случай сильной запятненности диска звезды в момент проведения фотометрических наблюдений. Найденное предельное значение ускорения силы тяжести  $\lg g_{\text{min}} = 4.08$ . Принятое в работе значение  $\lg g$  равно среднему от предельных значений, т.е.  $\lg g = 4.12$ . Отметим, что неопределенность в оценке  $\lg g$  мало (примерно на 40 К) меняет значение  $T_{\text{eff}}$  и связанные с ним величины остальных параметров. Заметим, что полученные нами значения ускорения силы тяжести прекрасно согласуются с результатами Касагранде и др. [14]. Для наглядного представления согласия модельного и наблюдаемого спектров мы построили карты изолиний суммы квадратов невязок в плоскостях искомого параметров в окрестности найденного решения, которые показаны на рис. 3.

Звезда с температурой  $T_{\text{eff}} = 5720$  К и ускорением силы тяжести  $\lg g = 4.12$  ложится на изохрону возрастом 10.5 млрд лет, а соответствующие ей масса и радиус:  $M/M_{\odot} = 0.96 \pm 0.03$  и  $R/R_{\odot} = 1.42 \pm 0.02$ . Из отношения масс компонентов  $q = M_1/M_2$  следует, что масса вторичного компонента  $M_2 = 0.645 \pm 0.02 M_{\odot}$ . На общей с первичным компонентом изохроне этому значению массы соответствует ускорение силы тяжести  $\lg g = 4.63 \pm 0.01$ , что дает радиус вторичной звезды  $R = 0.645 \pm 0.02 R_{\odot}$ .

Сравнивая полученную оценку массы первичного компонента с ее минимальным значением  $M \sin^3 i$ , найденным по кривым лучевых скоростей, находим оценку наклона орбиты  $i = 74^{\circ} \pm 2^{\circ}$ . Полученный наклон орбиты в пределах ошибок



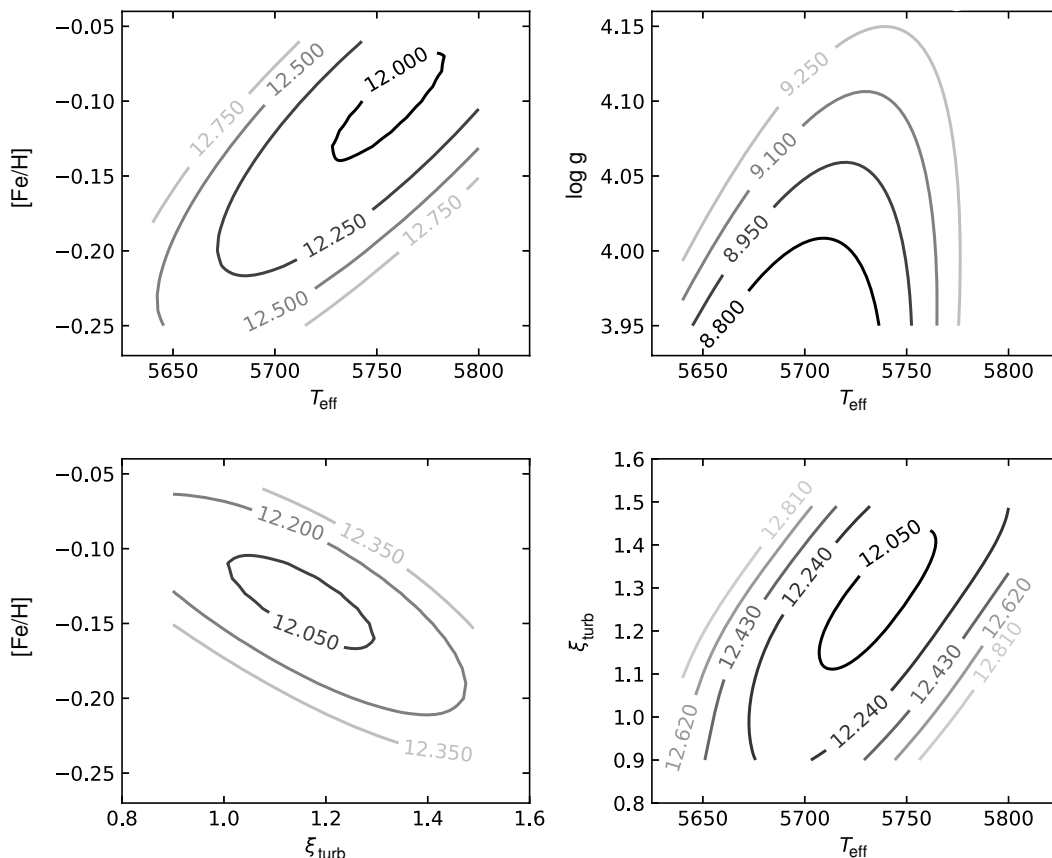


Рис. 3. Карты изолиний суммы квадратов невязок между наблюдаемым и теоретическим спектрами.

совпадает с углом наклона оси вращения главного компонента  $i = 70^\circ \pm 6^\circ$ , найденным по проекции скорости вращения  $v \sin i$  и радиусу звезды  $R$ . Ввиду отсутствия в системе затмений можно наложить верхнее ограничение на наклон орбиты  $i_{\max}$ , определяемый по формуле  $\cos i_{\max} = (R_1 + R_2)/a$ . Используя принятые оценки радиусов компонентов и большой полуоси системы ( $a \sin i$ ), имеем  $i_{\max} = 77^\circ.5$ , что согласуется с найденной оценкой  $i$ .

Определение  $v \sin i$  вторичного компонента проводилось путем фурье-разложения его LSD-профиля. После определения частоты первого минимума  $\sigma_1$  в спектре мощности находился параметр  $v \sin i$  по формуле [30]:

$$\sigma_1 = \frac{1}{v \sin i} (0.610 + 0.062\epsilon + 0.027\epsilon^2 + \dots),$$

где  $\epsilon$  — средний коэффициент линейного закона потемнения диска, который определялся по таблицам [31]. Таким способом получили  $v \sin i = 18.6 \pm 2.2$  км с<sup>-1</sup>. Этим же методом была оценена скорость вращения первичного компонента  $v \sin i = 35.4$  км с<sup>-1</sup>, которая хорошо согласуется со значением  $v \sin i$ , найденным моделированием спектра.

Таблица 3. Параметры компонентов V837 Tau

| Параметр                                 | Компонент 1      | Компонент 2     |
|--|------------------|-----------------|
| $T_{\text{eff}}$ , К                     | $5720 \pm 70$    | $4100 \pm 50$   |
| $R/R_\odot$                              | $1.42 \pm 0.02$  | $0.65 \pm 0.02$ |
| $M/M_\odot$                              | $0.96 \pm 0.03$  | $0.65 \pm 0.02$ |
| $\lg g$                                  | $4.12 \pm 0.06$  | $4.63 \pm 0.01$ |
| $v \sin i$ , км с <sup>-1</sup>          | $35 \pm 1.5$     | $18.6 \pm 2.2$  |
| $\xi_{\text{turb}}$ , км с <sup>-1</sup> | $1.2 \pm 0.1$    | —               |
| [Fe/H]                                   | $-0.15 \pm 0.09$ | —               |

Полученные в настоящей работе параметры компонентов V837 Tau перечислены в таблице 3.

## 6. АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Химический состав атмосферы главного компонента V837 Tau найден итерационным путем вместе с определением его параметров. Однако определение содержания каждого элемента происходило отдельно путем нахождения локальных минимумов среднеквадратичных отклонений теоретиче-

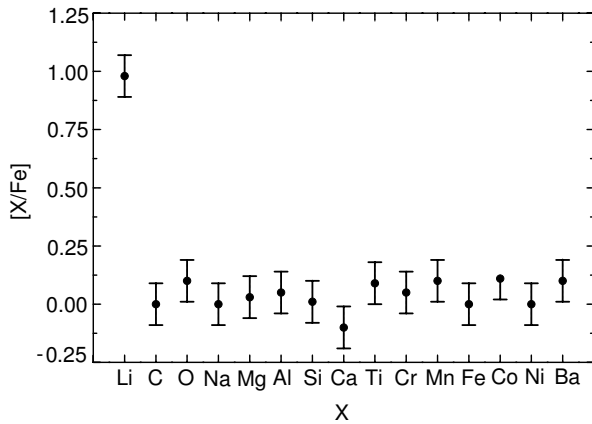


Рис. 4. Содержание химических элементов в атмосфере главного компонента V837 Tau.

ского и наблюдаемого спектров. Таким образом, ошибки абсолютных содержаний отдельных химических элементов  $[X/H]$  и средней металличности  $[Fe/H]$  в целом обусловлены неопределенностями параметров атмосферы и не могут быть меньше  $[X/H] \approx 0.09$  dex. Однако ошибки содержаний относительно металличности  $[X/Fe]$  благодаря использованию дифференциального подхода оказываются заметно меньше, зависят от вклада элементов в спектр наблюдаемых линий и варьируются от 0.06 dex для Mg, Ca, Na до 0.15 dex для O, Co, Li.

Найденный химический состав в целом показывает схожесть содержаний большинства элементов и их соответствие металличности (см. рис. 4). Индекс металличности  $[Fe/H] = -0.15 \pm 0.09$  совпадает с оценкой  $[Fe/H] = -0.16$  [14] и указывает на принадлежность объекта к области тонкого галактического диска с эпохой звездообразования на 3–4 млрд лет раньше солнечной, что соответствует факту наблюдаемого схода звезды с главной последовательности. Среднее содержание элементов  $\alpha$ -процесса (C, O, Mg, Si) оказывается на 0.05 dex выше полученной металличности, что ожидаемо для звезд с слабым дефицитом железа [32, 33] и заметно меньше оценки  $[\alpha/Fe] = 0.14$  из работы [14]. Аналогичный слабый избыток  $[Ti + Cr + Mn + Co + Ni/Fe] = 0.07$  показывают элементы группы железа. Для элементов нейтронного захвата удалось определить лишь содержание бария  $[Ba/Fe] = 0.10$ , исключая принадлежность V837 Tau к какой-либо разновидности бариевых звезд. Среди отдельных элементов выделяется пониженное содержание кальция  $[Ca/Fe] = -0.10 \pm 0.06$ , не объясняемое ошибками определения. Заметим, что в обзоре [34] найдены звезды типа BY Dra (например, V1803 Cyg) с аналогичным дефицитом кальция как относительно железа, так и элементов  $\alpha$ -процесса. Кро-

ме того, отметим значительный избыток лития  $[Li/Fe] = 0.93 \pm 0.15$ , в целом соответствующий ожидаемому для звезды типа BY Dra с температурой  $T_{\text{eff}} = 5700$  K [35]. Таким образом, содержание элементов в атмосфере V837 Tau согласуется со стандартным химическим составом магнитоактивных звезд поздних спектральных классов.

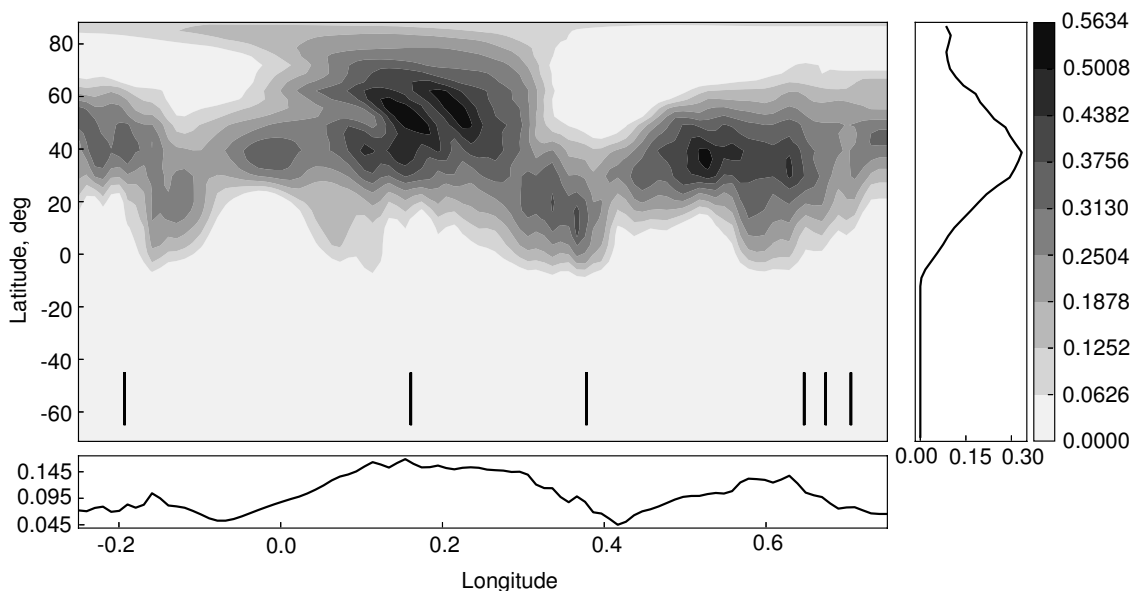
### 7. ЗАПЯТНЕННОСТЬ ПЕРВИЧНОГО КОМПОНЕНТА

Одним из проявлений пятен на поверхности звезды являются периодические искажения профилей фотосферных спектральных линий. В них появляются особенности («квазиэмиссии» либо «квазиабсорбции»), положение которых определяется лучевой скоростью пятен. Имея набор спектральных профилей, полученных в разные фазы вращения звезды, можно восстановить распределение пятен на звездной поверхности методом доплеровского картирования. Используемый нами код доплеровской томографии RECONS<sup>2</sup> предполагает разбиение доступной наблюдениям поверхности звезды (полярный угол  $\theta < i + 90^\circ$ ) на большое количество элементарных площадок. Каждой площадке присваивается фактор наполнения  $f$  — доля площади, занятая пятнами. Предполагается двухтемпературная структура поверхности звезды, где пятна и незапятнанная фотосфера имеют фиксированные значения температур  $T_{\text{ph}}$  и  $T_{\text{sp}}$  соответственно. Интенсивности излучения площадок  $I$  определяются как  $I = fI_{\text{sp}} + (1 - f)I_{\text{ph}}$ , где  $I_{\text{sp}}$  и  $I_{\text{ph}}$  — интенсивности излучения пятна и незапятнанной фотосферы соответственно. Вычисление остаточных интенсивностей модельного профиля линии  $r'_\lambda$  основано на интегрировании интенсивности по видимой поверхности звезды с учетом доплеровского сдвига спектральных линий площадок. Восстановление распределения фактора наполнения является некорректной обратной задачей, которая решалась путем минимизации регуляризирующей функции Тихонова, имеющей вид

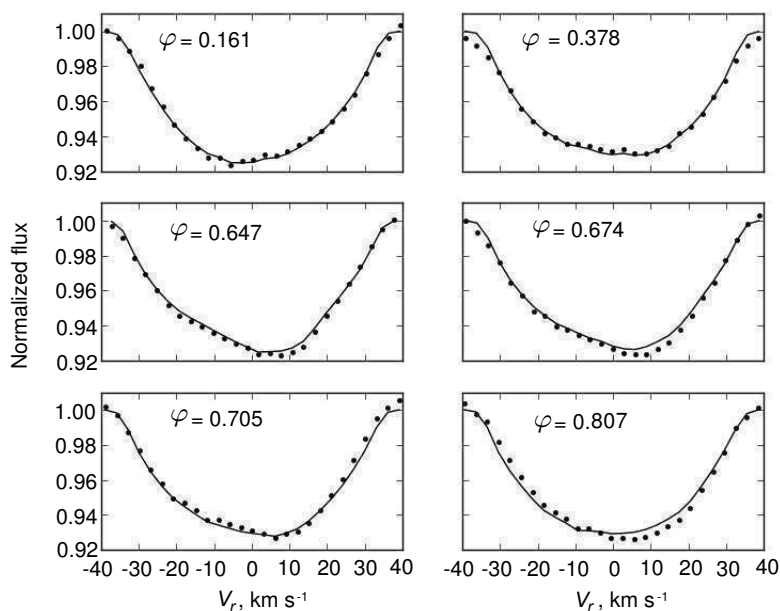
$$\sum_{\varphi} \sum_{\lambda} \frac{1}{\sigma_{\varphi\lambda}^2} (r'_{\varphi\lambda} - r_{\varphi\lambda})^2 + \alpha \sum_i (\nabla f_i)^2. \quad (6)$$

Первый член этой функции представлен взвешенной с ошибкой  $\sigma_{\varphi\lambda}$  суммой квадратов невязок между модельными  $r'_{\varphi\lambda}$  и наблюдаемыми  $r_{\varphi\lambda}$  спектральными профилями. Суммирование проводится по наблюдаемым фазам вращения  $\varphi$  и наблюдаемым длинам волн  $\lambda$ . Модельные профили вычисляются путем интерполяции предварительно рассчитанных таблиц интенсивности излучения пятен

<sup>2</sup>Разработанный нами код доплеровского картирования поверхности холодных запятанных звезд RECONS доступен по адресу <https://github.com/arneb89/RECONS>.



**Рис. 5.** Карта распределения фактора наполнения по поверхности первичного компонента V837 Тау в проекции Меркатора. Долгота выражена в фазах орбитального периода, в которых плоскость меридиана проходит через луч зрения. Широта пятен отсчитывается от экватора и считается положительной для полушеры, где расположен наблюдаемый полюс звезды. Вертикальными штрихами указаны фазы, в которых получены спектры, используемые для картирования. Помимо карты распределения показаны распределения среднего фактора наполнения по долготе и широте.



**Рис. 6.** Сравнение наблюдаемых (точки) и модельных (линии) LSD-профилей.

и незапятнанной фотосферы по направлениям  $\mu$  и длине волны  $\lambda$ . Второе слагаемое представляет собой сумму квадратов модулей градиентов факторов наполнения и, следовательно, требует гладкости искомого распределения  $f$ . Вклад первого и второго слагаемого в значение функции Тихонова определяется параметром регуляризации  $\alpha$ . При  $\alpha \rightarrow 0$  доминирует первый член, и решение макси-

мально точно описывает наблюдаемые спектральные профили, воспроизводя и шумовую составляющую. При этом шумы приводят к появлению «ряби» на звездной поверхности, что делает полученное решение непригодным для анализа. При  $\alpha \rightarrow \infty$  доминирует второй член, распределение пятен становится однородным, а модельные профили не изменяются со временем. Таким образом,

параметр регуляризации определялся из условия согласования модельных спектральных профилей с теоретическими в пределах известных ошибок  $\sigma_{\varphi\lambda}$ . Поиск минимума функции (6) проводился методом Левенберга—Марквардта.

Полученные спектры являются довольно зашумленными, что не позволяет выявить эффекты запятненности в спектральных линиях. Однако рассчитанные LSD-профили имеют достаточно высокое отношение  $S/N$  для проявления в них выраженных эффектов пятен, поэтому их можно применять в доплеровском картировании. Для восстановления звездной поверхности мы использовали спектры, полученные на PTT-150 в период с 9 по 14 января 2014 г. Для уменьшения скважности наблюдений в данную выборку мы также добавили LSD-профиль спектра номер 49, полученный на ЗТШ 11 февраля 2014 г. Сравнение LSD-профилей спектров с номерами 49 и 39, разделенных малым интервалом по фазе, не выявляет изменений, что указывает на стабильность распределения пятен в течение месяца.

Необходимым для картирования параметром является температура пятен. К сожалению, для V837 Tau отсутствуют кривые блеска в нескольких полосах, которые позволили бы сделать оценку температуры пятен. Также мы не можем оценить этот параметр из кривой отношения глубин линий ввиду высокой скважности наших наблюдений. По этой причине был зафиксирован температурный контраст  $\Delta T = T_{\text{ph}} - T_{\text{sp}} = 1000$  К, примерно равный среднему между тенью и полутенью в солнечных пятнах.

Для создания сетки модельных профилей мы рассчитали набор теоретических спектров с линиями и чистым континуумом для температур  $T_{\text{ph}}$  и  $T_{\text{sp}}$  и набора направлений излучения  $\mu$ . Вычисление спектров проводилось при помощи кода программы SPECTR [36] для найденных выше параметров атмосферы первичного компонента V837 Tau. Затем мы восстановили LSD-профили для каждого спектра и тем самым сформировали необходимую для RECONS сетку профилей.

Восстановленная карта распределения пятен по поверхности главного компонента V837 Tau представлена на рис. 5, а сравнение наблюдаемых и модельных LSD-профилей дано на рис. 6. На представленной карте видно, что пятна концентрируются в поясе, центрированном на широту  $40^\circ$ . Суммарная запятненность составила 5% от наблюдаемой части поверхности звезды. Необходимо отметить, что на полученной нами карте отсутствуют пятна с отрицательными широтами, т.е. в полусфере, противоположной по отношению к наблюдателю. Мы считаем, что это связано с двумя эффектами. Во-первых, благодаря отличию угла

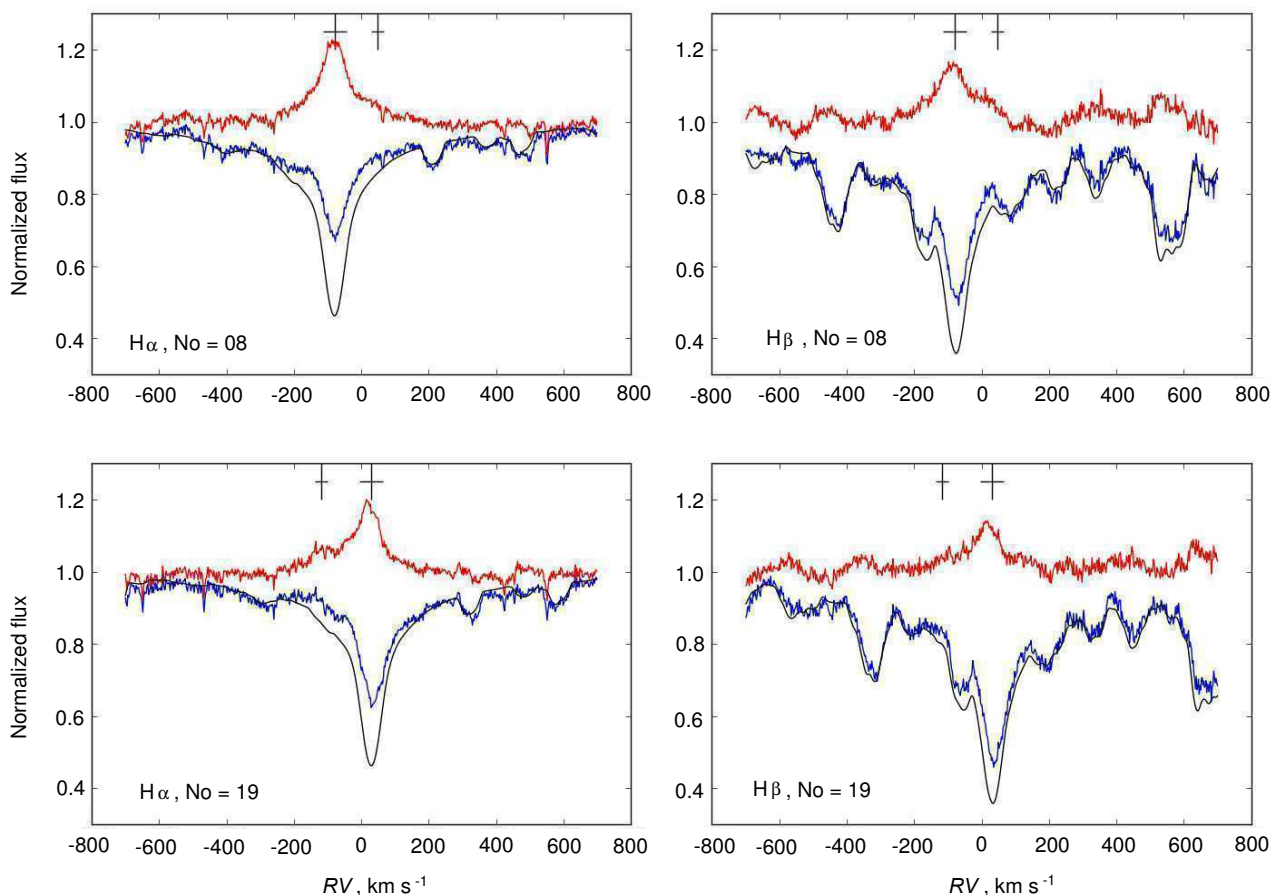
наклона оси вращения  $i$  от  $90^\circ$ , пятна на отрицательных широтах при прочих равных условиях будут давать меньший вклад в общее излучение звезды по сравнению с пятнами на положительных широтах из-за меньшего телесного угла, под которым они наблюдаются. Во-вторых, наши наблюдения имеют большую скважность, поэтому кратковременное появление пятен с отрицательными широтами на видимом диске не отражается на восстановленной карте звезды.

## 8. ХРОМОСФЕРНАЯ ЭМИССИЯ

Магнитная активность в хромосфере проявляется в видимом диапазоне спектра эмиссией в водородных линиях бальмеровской серии, а также в линиях Ca II H и K. К сожалению, полученные спектры имеют низкое отношение  $S/N$  в синей области, и в настоящей работе мы ограничились анализом поведения линий H $\alpha$  и H $\beta$ .

Выделение эмиссионной составляющей проводилось путем вычитания из наблюдаемых спектров теоретического спектра фотосферы, который рассчитывался для найденных выше параметров яркого компонента V837 Tau ( $T_{\text{eff}} = 5720$  К,  $\lg g = 4.12$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.15$ ,  $\xi_{\text{turb}} = 1.2$  км с $^{-1}$ ). Модель атмосферы звезды строилась при помощи программы LbL [6]. Для решения уравнения переноса излучения в рассматриваемых спектральных участках использовалась программа SynthV [5], а необходимые для расчетов атомные параметры были взяты из базы данных VALD 3 [8?]. Полученные спектры были свернуты с функцией вращательного уширения для  $v \sin i = 35$  км с $^{-1}$  и аппаратной функцией спектрографа. Примеры сравнения наблюдаемого и теоретического спектра в окрестностях линий H $\alpha$  и H $\beta$  представлены на рис. 7. Несмотря на имеющиеся ошибки в описании наблюдаемых спектров, очевидна значительная эмиссионная составляющая в водородных линиях. Эквивалентные ширины эмиссионных профилей H $\alpha$  и H $\beta$  варьируются в диапазонах  $EW(\text{H}\alpha) = 0.35\text{--}0.79$  Å и  $EW(\text{H}\beta) = 0.19\text{--}0.39$  Å. В моменты максимального разделения компонентов системы в эмиссионных профилях H $\alpha$  заметна эмиссия вторичного компонента, положение которого коррелирует с лучевой скоростью звезды.

В работе [37] показано, что отношения эмиссионных потоков в водородных линиях  $E_{\text{H}\alpha}/E_{\text{H}\beta}$  различны для протуберанцев и флоккул. Так  $E_{\text{H}\alpha}/E_{\text{H}\beta} \sim 1\text{--}2$  может быть достигнуто как для флоккул, так и для протуберанцев, видимых на против звездного диска. Отношение  $E_{\text{H}\alpha}/E_{\text{H}\beta} > 3$  достигается только в протяженных протуберанцах,



**Рис. 7.** Примеры сравнения наблюдаемого (нижняя зашумленная кривая) и теоретического спектра (гладкая кривая) в окрестностях линий  $H\alpha$  и  $H\beta$ . Верхняя зашумленная кривая — результат вычитания теоретического спектра из наблюдаемого. Вертикальными штрихами указаны лучевые скорости первичного и вторичного компонентов. Ширина горизонтальных штрихов равна удвоенному значению  $v \sin i$  компонентов системы.

видимых вне лимба звезды. Для расчета мы воспользовались формулой

$$\frac{E_{H\alpha}}{E_{H\beta}} = \frac{EW(H\alpha)}{EW(H\beta)} 0.2444 \times 2.512^{(B-R)} \quad (7)$$

из работы [37]. Полученные отношения потоков лежат в диапазоне от 2 до 3, что не позволяет сделать однозначных выводов о природе эмиссий.

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнен детальный анализ спектров хромосферно-активной двойной звезды V837 Tau. По кривым лучевых скоростей уточнены параметры орбиты системы. Путем моделирования спектров и анализа фотометрических данных определены параметры атмосферы главного компонента, а при помощи теоретических изохрон сделана оценка параметров вторичного компонента. Анализ химического состава V837 Tau указывает на пониженное содержание кальция и избыток лития, свойственные магнитоактивным звездам

поздних спектральных классов. В LSD-профилях яркого компонента имеются искажения, вызванные фотосферными пятнами. Методом доплеровского картирования восстановлена карта распределения пятен по поверхности звезды, которая демонстрирует их концентрацию в средних широтах (около  $40^\circ$ ). В профилях линий  $H\alpha$  и  $H\beta$  присутствует переменная эмиссионная составляющая. Эмиссионные профили  $H\alpha$  и  $H\beta$  содержат слабую эмиссию от вторичного компонента, которая свидетельствует о его повышенной магнитной активности. Высокая яркость ( $V \approx 7^m 3$ ) и большая запятненность звезды делают ее хорошим кандидатом для проведения детальных исследований распределения магнитного поля и его эволюции спектроскопическими методами.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность TÜBİTAK, КФУ и ИКИ за помощь в использовании РТТ-150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп вблизи г. Анталья).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты РФФИ 16-32-60039 и 16-02-01145). Работа В. В. Шиманского выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-42-160003.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. F. Heard, Publ. David Dunlap Obs. **2**, 107, (1956).
2. J.-M. Carquillat, R. Nadal, N. Ginestet, and A. Pedoussaut, Astron. and Astrophys. **74**, 113 (1979).
3. A. V. Raveendran, S. Mohin, and M. V. Mekkadon, IBVS, № 2694 (1985).
4. R. A. Stockton and F. C. Fekel, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **256**, 575 (1992).
5. V. V. Tsybal, ASP Conf. Ser. **108**, 198 (1996).
6. D. Shulyak, V. Tsybal, T. Ryabchikova, et al., Astron. and Astrophys. **428**, 993 (2004).
7. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. **112**, 525 (1995).
8. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. **138**, 119 (1999).
9. J.-F. Donati, M. Semel, B. D. Carter, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **291**, 658 (1997).
10. A. Tkachenko, T. Van Reeth, V. Tsybal, et al., Astron. and Astrophys. **560**, 37 (2013).
11. L. Rimoldini, P. Dubath, M. Süveges, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **427**, 2917 (2012).
12. E. Paunzen, Astron. and Astrophys. **580**, A23 (2015).
13. M. S. Bessell, F. Castelli, and B. Plez, Astron. and Astrophys. **333**, 231 (1998).
14. L. Casagrande, R. Schönrich, M. Asplund et al., Astron. and Astrophys. **530**, A138 (2011).
15. *The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission* (ESA Spec. Publ., 1997).
16. F. Van Leeuwen, Astron. and Astrophys. **474**, 653 (2007).
17. R. Kurucz, SAO CD-Roms (1994).
18. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **427**, 127 (2012).
19. Y. Y. Balega, A. Kh. Rzaev, V. V. Shimansky, and G. Weigelt, Astron. and Astrophys. (in press).
20. V. S. Menzhevitski, N. N. Shimanskaya, V. V. Shimansky, and D. O. Kudryavtsev, Astrophysical Bulletin **69**, 169 (2014).
21. F. Castelli and R. L. Kurucz, IAU Symp. **210**, A20 (2003).
22. V. V. Shimansky, N. V. Borisov, and N. N. Shimanskaya, Astronomy Reports **47**, 763 (2003).
23. S. E. Nersisyan, A. V. Shavrina, and A. A. Yaremchuk, Astrophysics **30**, 147 (1989).
24. C. R. Vidal, J. Cooper, and E. W. Smith, Astrophys. J. Suppl. **25**, 37 (1973).
25. R. L. Kurucz and I. Furenlid, SAO Spec. Rep. **387**, 1 (1979).
26. A. Unsold, *Physik der Sternatmosphären* (Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1955).
27. V. V. Shimansky, S. A. Pozdnyakova, N. V. Borisov, et al., Astronomy Letters **34**, 423 (2008).
28. N. A. Sakhbullin, Trudy Kazanskoj Gorodskoj Astronomicheskoy Observatorii **48**, 9 (1983).
29. E. Anders and N. Grevesse, Geochimica Cosmochimica Acta **53**, 197 (1989).
30. A. Reiners and J. H. M. M. Schmitt, Astron. and Astrophys. **384**, 155 (2002).
31. W. Van Hamme, Astron. J. **106**, 2096 (1993).
32. M. Samland, Astrophys. J. **496**, 155 (1998).
33. C. Kobayashi, H. Umeda, K. Nomoto, et al., Astrophys. J. **653**, 1145 (2006).
34. T. V. Mishenina, C. Soubiran, O. Bienayme, et al., Astron. and Astrophys. **489**, 923 (2008).
35. T. V. Mishenina, C. Soubiran, V. V. Kovtyukh, et al., Astron. and Astrophys. **547**, A106 (2012).
36. N. A. Sakhbullin and V. V. Shimanskij, Astron. Zh. **74**, 432 (1997).
37. J. C. Hall and L. W. Ramsey, Astron. J. **104**, 1942 (1992).

## Analysis of the Spectroscopic Observations of RS CVn Type Star V837 Tau

A. I. Kolbin, V. V. Shimansky, I. Yu. Alekseev, N. N. Shimanskaya, M. M. Gabdeev, and V. V. Tsybal

We present an analysis of the spectra of the star V837 Tau, which belongs to a class of chromosphere-active RS CVn type stars. The observational material was obtained with the 1.5-m Russian-Turkish telescope RTT-150 and the 2.6-m Shajn telescope of the Crimean astrophysical observatory. To reveal signs of the photosphere spottedness of the primary and to isolate the faint secondary, we performed the deconvolution of the “averaged” spectral profile of the system. By describing the radial velocity curves, we refined the orbital elements of the binary system, and by modeling spectra we determined the fundamental parameters of the components, as well as the chemical composition of the atmosphere of the bright component. Using the Doppler mapping method we reconstructed the distribution of spots on the surface of the bright star. We show that the spots are concentrated in a belt at medium (about  $40^\circ$ ) latitudes. The hydrogen line profiles have a variable emission feature in the bright component, and the  $H\alpha$  line exhibits traces of chromospheric activity in the secondary.

Keywords: *stars: binary—stars: individual: V837 Tau*