

УДК 524.31.01-355.3-56

## МИКРОПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ ОБ-ЗВЕЗД. III. СВЕРХГИГАНТ $\rho$ Leo

© 2007 г. А. Ф. Холтыгин<sup>1</sup>, С. Н. Фабрика<sup>2</sup>, Т. Е. Бурлакова<sup>2,3</sup>, Г. Г. Валявин<sup>2,3</sup>,  
Г. А. Чунтонов<sup>2</sup>, Д. О. Кудрявцев<sup>2</sup>, Д. Канг<sup>3</sup>, М. В. Юшкин<sup>2</sup>, Г. А. Галазутдинов<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Астрономический институт им. В.В. Соболева

С.-Петербургского государственного университета, С.-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Н. Архыз, Россия

<sup>3</sup>Бохинсанская оптическая астрономическая обсерватория, Кун-Пук, Республика Корея

<sup>4</sup>Корейский институт астрономии и космических наук, Дайджон, Республика Корея

Поступила в редакцию 16.12.2006 г.; после доработки 05.04.2007 г.

Проведены наблюдения яркого сверхгиганта  $\rho$ Leo (B1 Iab) в январе–феврале 2004 г. на 6-м телескопе БТА и 1.8-м телескопе Бохинсанской оптической астрономической обсерватории (Южная Корея). Получено около 47 спектров звезды с высоким временным разрешением (4–10 мин), отношением сигнал/шум от 300 до 1000 и спектральным разрешением от 45000 до 60000. Обнаружена переменность профилей линий HeI, SiII, SiIII и NII. Эта переменность, возможно, связана с вращательной модуляцией профилей и фотосферными пульсациями  $\rho$ Leo. Обсуждается влияние возможного магнитного поля звезды на изменения профилей линий в ее спектре.

PACS: 97.20.Pm, 95.85.Kr, 97.10.Sj

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Спектральные наблюдения горячих звезд в УФ- [1, 2], видимом [1–6] и рентгеновском [7, 8] диапазонах свидетельствуют о присутствии в атмосферах этих звезд структур разных размеров и плотностей с временами жизни от долей часа до нескольких дней. Изменения профилей линий в спектрах ОБ-звезд являются, главным образом, регулярными или квазирегулярными. В профилях линий в спектрах многих В-звезд и 6 звезд спектрального класса О обнаружены регулярные короткопериодические (3–12 ч) изменения профилей линий HeI, SiIII и других ионов, связываемые с нерадиальными пульсациями (НРП) этих звезд [6].

В отличие от звезд спектрального класса В, амплитуда вариаций профилей линий в спектрах звезд спектрального класса О и ранних (В1–В3) подклассов звезд спектрального класса В относительно мала (1%–3%; см., например, [9]), так что следует говорить скорее о *микрорегулярности* профилей линий в спектрах этих звезд. Обнаружение и, тем более, выяснение природы переменности требует проведения наблюдений с высоким временным и спектральным разрешениями и отношением сигнал/шум  $\geq 300$ .

Одним из факторов, способствующим образованию крупномасштабных структур в атмосферах

ОБ-звезд, возможно, является магнитное поле (несколько сотен Гс на поверхности звезды) [10]. В настоящее время магнитное поле достаточно надежно обнаружено только у двух звезд спектрального класса О —  $\theta^1$  Ori C [11] и HD 191612 [12] — и у ряда звезд ранних подклассов спектрального класса В [13].

В работе [14] нами предложена программа исследования переменности и поиска свидетельств наличия магнитного поля у звезд поздних подклассов спектрального класса О и ранних подклассов спектрального класса В, которая является продолжением исследования микрорегулярности профилей линий в спектрах горячих звезд, изложенного нами в статьях [9, 15, 16].

В настоящей статье описаны наблюдения программной звезды  $\rho$ Leo — сверхгиганта спектрального класса В1Iab, — выполненные в 2004 г., и представлены результаты исследования микрорегулярности профилей линий в ее спектре. В 2005–2006 гг. эта же звезда наблюдалась нами с анализатором круговой поляризации на БТА. Анализ наблюдений  $\rho$ Leo, проведенных в 2005–2006 гг. с использованием анализатора круговой поляризации и результаты поиска магнитного поля  $\rho$ Leo предполагается описать в следующей статье данной серии.

Таблица 1. Параметры системы  $\rho$ Leo

Параметр	Значение	Ссылка
$T_{eff}$ , К	24200	[18]
$\lg g$	3.09	[18]
$M/M_{\odot}$	22	[17]
$R/R_{\odot}$	32	[17]
	37.4	[19]
$V_{\infty}$ , км/с	1110	[19, 23]
$-\lg(\dot{M}/M_{\odot})$	-6.20	[17]
$\lg(L/L_{\odot})$	5.18	[17]
$V \sin i$ , км/с	75	[19, 23]
	60	[24]
$\lg \varepsilon(C)$	7.5	[19]
$\lg \varepsilon(N)$	8.3	[19]
$\lg \varepsilon(O)$	8.4	[19]

Во втором разделе настоящей работы даны основные сведения о звезде и описана методика наблюдений и обработки спектров. Результаты поиска регулярных вариаций профилей линий в спектре звезды представлены в третьем разделе. В четвертом разделе обсуждаются эволюционный статус звезды и влияние магнитного поля на переменность профилей. В заключении сформулированы выводы настоящего исследования.

## 2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗВЕЗДЕ. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Сверхгигант  $\rho$ Leo (HD 91316) является относительно медленно вращающейся звездой спектрального класса B1 Iab. Эффективная температура звезды  $T_{eff}$  определяется неуверенно. В работе [17] дано значение  $T_{eff} = 20260$  К. Согласно [18]  $T_{eff} = 24200$  К. Значение  $T_{eff} = 22000$  К приведено в работе [19].

Звезда  $\rho$ Leo на диаграмме Герцшпрунга–Рессела находится в области переменных звезд типа  $\beta$ Сер ранних подклассов спектрального класса В (см., например, [20]). Параметры звезды представлены в табл. 1. В таблице  $T_{eff}$  — эффективная температура звезды,  $M$  — масса главного компонента системы,  $\dot{M}$  — скорость потери массы звездой,  $L$  — болометрическая светимость,  $V_{\infty}$  — терминальная скорость звездного ветра,  $V \sin i$  — скорость вращения звезды,  $\lg \varepsilon(EI)$  — содержание элементов в шкале  $\lg \varepsilon(H) = 12$ .

В 2004 г. звезда наблюдалась нами в САО РАН на 6-м телескопе БТА и на 1.8-м телескопе Бохинсанской оптической астрофизической обсерватории (БОО, Южная Корея). Сведения о наблюдениях, выполненных в 2004 г., даны в табл. 2. Спектральные наблюдения звезды в САО 10/11 января 2004 г. произведены с использованием кварцевого эшелле-спектрографа НЭС [21], стационарно установленного в фокусе Нэсмита и оснащенного ПЗС-детектором  $2048 \times 2048$  пикс. (Uppsala CCD) в области длин волн  $\lambda\lambda 4500-6000 \text{ \AA}$ .

Для увеличения проникающей способности спектрографа применялся резатель изображения на три среза [22]. В таком варианте наблюдений достигается спектральное разрешение  $R \approx 60000$  при дисперсии  $0.033 \text{ \AA/пикс}$ . Размер изображений во время наблюдений составлял около  $3''$ . В качестве спектра сравнения использовалась торий-аргоновая лампа. При применении резателя изображений каждый эшелльный порядок изображения представлялся тремя подпорядками (срезами). Аппаратное смещение верхнего и нижнего среза в отдельном порядке относительно среднего среза определялось методом кросс-корреляции в изображениях спектров сравнения. Полученные таким образом три среза в отдельно взятом порядке суммировались методом медианного среднего с учетом найденных аппаратных смещений.

Первичная редукция ПЗС-изображений эшелльных спектров была выполнена в среде MIDAS [9]. Стандартные алгоритмы процедуры ECHELLE программного пакета MIDAS были адаптированы нами для работы с данными, полученными с резателем изображения. Были выполнены медианная фильтрация и усреднение кадров подложки (процедура BIAS) с последующим вычитанием ее из остальных кадров, полученных в процессе наблюдений, а также очистка кадров от следов космических частиц. Для определения положения спектральных порядков использовался метод Баллестера [25].

Для определения функции вклада рассеянного света выделялось межпорядковое пространство на кадрах и производилась двумерная интерполяция. Эта функция записывалась в отдельные кадры, которые вычитались из исходных изображений. Была выполнена экстракция спектральных порядков из редуцированных изображений спектра звезды, плоского поля и спектра эталона длин волн и редукция за плоское поле. Калибровка спектров по длинам волн производилась с использованием двумерной полиномиальной аппроксимации данных отождествлений линий спектра.

Для исследования переменности профилей линий обработанные спектры нормировались на континуум, построенный в каждом эшелле-порядке.

Таблица 2. Наблюдения  $\rho$ Leo в 2004 г.

Дата (2004 г.)	Обсерватория, телескоп	Спектрограф, приемник (ПЗС)	Число спектров	Экспозиция, мин	Полное время наблюдений, ч
10/11 января	САО, БТА	НЭС, 2048 × 2048 пикс.	30	6	3.5
	БОАО, 1.8-м	ВОЕС, 2048 × 4096 пикс.	2	9/10	0.6
14/15 января	БОАО, 1.8-м	ВОЕС, 2048 × 4096 пикс.	11	4	2.5
3/5 февраля	БОАО, 1.8-м	ВОЕС, 2048 × 4096 пикс.	4	4/7	3.0

Для проведения континуума в спектральных порядках, содержащих узкие спектральные линии, применялась методика Шергина и др. [26], использующая сглаживание спектров с переменным гауссоподобным фильтром с шириной окна 25–30 Å и с одинаковыми параметрами для всей последовательности спектров.

При проведении континуума в порядках, содержащих широкие спектральные линии, использовалась следующая процедура. Такие спектральные линии вырезались в фиксированных интервалах длин волн для всех 30 спектров, полученных в 2004 г. на БТА. Для установления положения континуума использовалась полиномиальная аппроксимация для всех длин волн порядка, исключая области вырезанных широких спектральных линий. Параметры аппроксимации оставались неизменными для всех спектров ряда. Такая процедура построения континуума обеспечивает стабильность и воспроизводимость проведения континуума на всех спектрах с точностью до десятых долей процента. Это позволяет достичь высокой точности получения разностных профилей линий и регистрировать переменность в профилях широких линий на уровнях до 0.2%.

Спектральные наблюдения звезды, выполненные в БОАО проводились в течение 4 наблюдательных ночей 11, 14, 15 января и 5 февраля 2004 г. с помощью оптоволоконного эшелле-спектрографа ВОЕС [27] 1.8-м телескопа обсерватории БОАО, оснащенного ПЗС-приемником (2048 × 4096 пикс.; размер пиксела 15 × 15 мкм).

Получено 17 эшелле-спектров со спектральным разрешением  $R \approx 44000$  в широкой спектральной области  $3782 \text{ \AA} < \lambda < 9803 \text{ \AA}$ . Звезда является достаточно ярким объектом, поэтому при времени экспозиции 4–10 мин было достигнуто высокое значение отношения  $S/N \approx 300$ . Интервал времени между получением последовательных спектров в каждую ночь составил 6–10 мин.

Первичная обработка ПЗС-изображений эшелльных спектров выполнена в среде IRAF. Последующая редукция спектров проводилась с использованием модифицированной версии 2004 г.

(DECH 20T) пакета DECH [28]. Для исследования переменности профилей линий спектры нормировались на континуум, процедура построения которого описана в [16].

Для всех 47 спектров звезды, полученных в 2004 г., длины волн были переведены стандартным образом в гелиоцентрическую шкалу. В дальнейшем для удобства анализа переменности профилей в качестве нуля-пункта шкалы длин волн было использовано среднее значение лучевой скорости центра масс  $\rho$ Leo:  $V_{rad} = 42 \text{ км/с}$  [24].

Для иллюстрации на рис. 1 даны средние спектры  $\rho$ Leo, определенные по 30 спектрам, полученным на БТА 10/11 января 2004 г. для тех спектральных порядков, в которых находятся все анализируемые в настоящей работе линии.

### 3. ВАРИАЦИИ ПРОФИЛЕЙ. ПОИСК РЕГУЛЯРНОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ

#### 3.1. Вариации средних профилей линий

Средние за ночь профили линий в спектрах звезд спектральных классов O и B часто показывают значительные изменения [6]. Для иллюстрации вариаций профилей в спектре  $\rho$ Leo от ночи к ночи на рис. 2 представлены средние за ночь профили линий NII  $\lambda$  5676.019 (NII  $\lambda$  5676), NII  $\lambda$  5679.562 (NII  $\lambda$  5680) и дублета HeI  $\lambda$  5875.621, 5875.966 (HeI  $\lambda$  5876).

На рисунке видно, что амплитуда вариаций потоков в линиях в спектре  $\rho$ Leo составляет 1%–2% в единицах интенсивности в соседнем континууме. Средние за ночь 11 января 2004 г. профили линий в спектрах, полученных в САО и БОАО, совпадают на уровне ошибок измерений, что свидетельствует о хорошей внутренней точности используемых нами процедур определения уровня континуума.

Обращают на себя внимание большое число сильных линий иона NII в спектре, особенно заметное в области длин волн 5660–5715 Å, что связано со значительным избытком азота в звезде (0.5 dex) по сравнению с солнечным содержанием [29] (табл. 1).

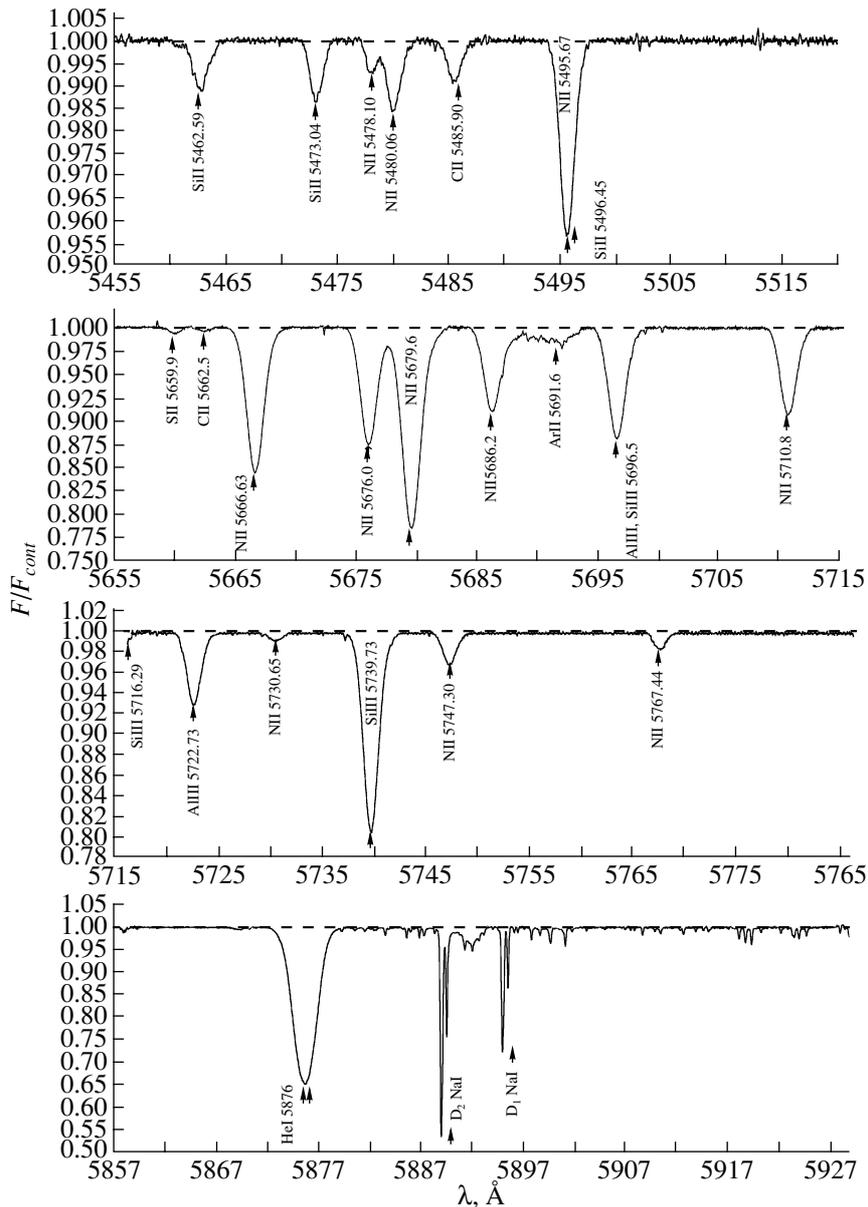


Рис. 1. Средний спектр  $\rho$ Leo в областях длин волн  $\lambda\lambda$  5455–5520  $\text{\AA}$ ,  $\lambda\lambda$  5655–5715  $\text{\AA}$ ,  $\lambda\lambda$  5715–5785  $\text{\AA}$  и  $\lambda\lambda$  5857–5927  $\text{\AA}$ . Вертикальными стрелками отмечены лабораторные длины волн линий.

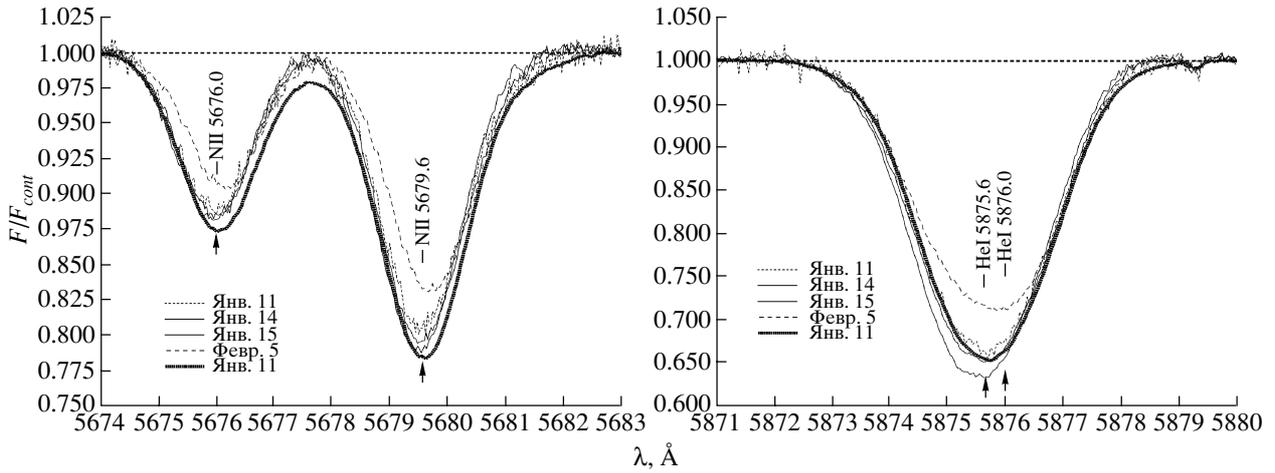
### 3.2. Изменения разностных профилей линий

Для выделения переменных деталей профилей линий нами были построены разностные профили (индивидуальный профиль линии минус средний профиль). Для получения среднего профиля использовались два набора спектров: 30 спектров, полученных на БТА в ночь 10/11 января 2004 г., и 17 спектров, полученных в 2004 г. в БОАО.

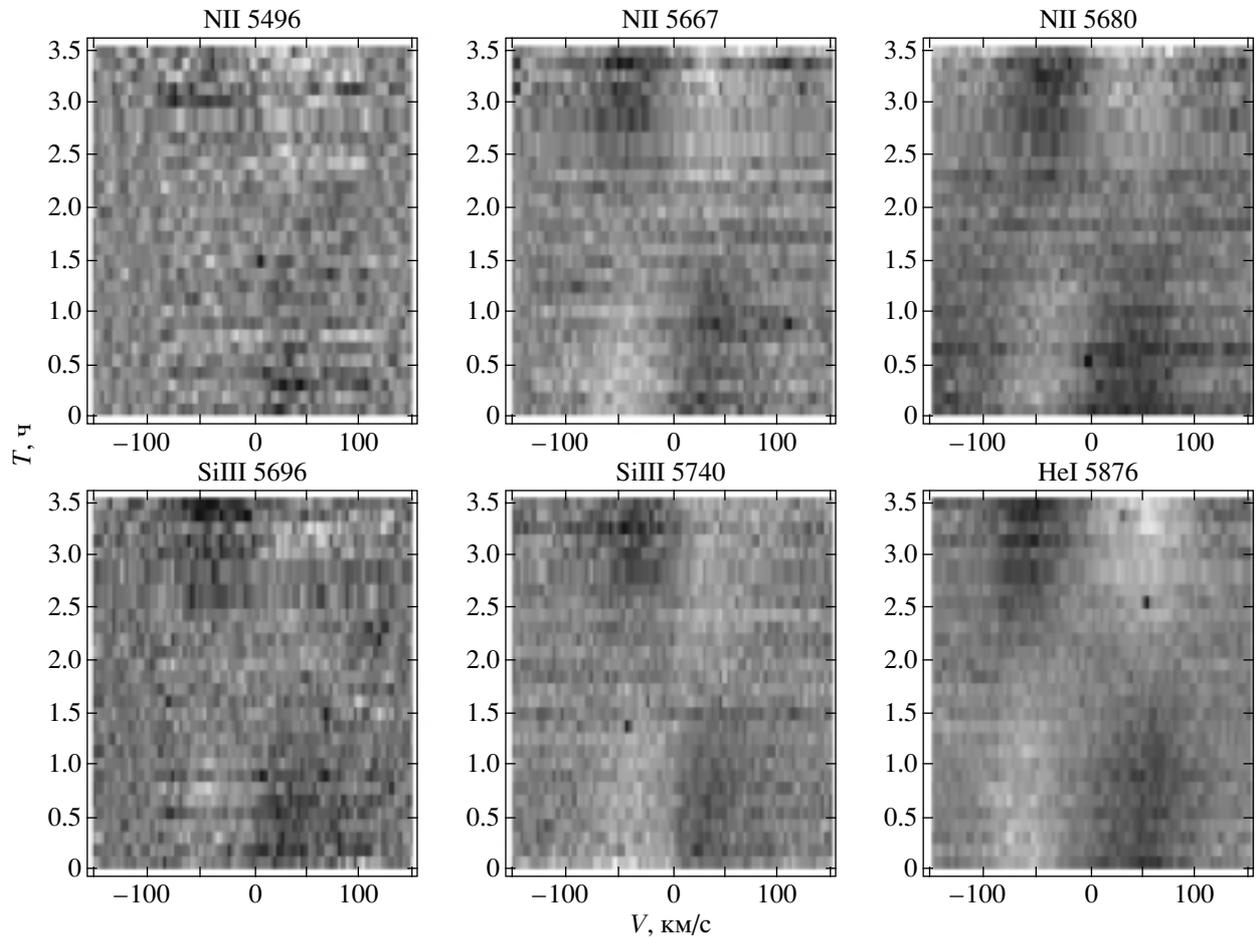
Для иллюстрации полученных результатов на рис. 3 представлены динамические разностные профили линий NII  $\lambda$  5495.666 (NII  $\lambda$  5496), NII  $\lambda$  5666.667, NII  $\lambda$  5679.562, SiII  $\lambda$  5695.522

(SiII  $\lambda$  5696), SiII  $\lambda$  5739.733 (SiII  $\lambda$  5740) и HeI  $\lambda$  5876 в спектре  $\rho$ Leo в шкале доплеровских смещений от центра линии, построенные по спектрам, полученным на БТА 11 января 2004 г. Эти линии были выбраны из тех соображений, чтобы они присутствовали как на спектрах, полученных САО, так и на спектрах, полученных в БОАО. Кроме того, выбирались достаточно сильные линии (остаточная интенсивность в линии  $r < 0.95$ ), для того, чтобы вариации профилей линий, вызываемые НРП могли бы быть выделены на фоне шумовых изменений профилей.

Отклонения индивидуальных профилей от сред-



**Рис. 2.** Средние профили линий NII  $\lambda$  5676.019, NII  $\lambda$  5679.562 (слева) и дублета HeI  $\lambda\lambda$  5875.621, 5875.966 для спектров, полученных в БОАО на 1.8-м телескопе 11, 14, 15 января и 5 февраля 2004 г. и в САО на БТА 11 января 2004 г. Вертикальными стрелками отмечены лабораторные длины волн линий.



**Рис. 3.** Динамические спектры вариаций профилей линий NII  $\lambda$  5495.67, NII  $\lambda$  5666.63, NII  $\lambda$  5679.56, SiIII  $\lambda$  5695.52, SiIII  $\lambda$  5739.73 и HeI  $\lambda$  5876 в спектре звезды  $\rho$ Leo в шкале доплеровских смещений от центра линии (ось абсцисс) для наблюдений на БТА 10/11 января 2004 г. Отклонения индивидуальных профилей линий от среднего показаны оттенками серого цвета. Светлым областям на рисунке соответствуют участки профилей, лежащие ниже уровня среднего профиля, темным — выше. Интервал между последовательными спектрами — 7 мин.

него по всем спектрам показаны оттенками серого цвета. Для большей иллюстративности разностные профили представлены в “негативном” виде, т.е. темным областям на рисунках соответствуют участки профиля выше среднего (горбы профиля), тогда как более светлые области (впадины) означают, что в данной части профиля индивидуальный профиль лежит ниже среднего. На диаграммах рис. 3 заметны регулярные изменения профилей.

В области линии HeI  $\lambda$  5876 видно присутствие широкой (50–100 км/с) переменной квазиабсорбционной детали (более светлая область в динамическом спектре). Эта деталь появляется на скорости около –100 км/с на первых (нижних) разностных профилях. Со временем эта деталь смещается в область центра линии. На последних (верхних) профилях эта деталь видна в области положительных скоростей. Такое поведение разностных профилей характерно для нерадиальных пульсаций [15, 16, 30]. Аналогичная деталь видна в динамических спектрах вариаций профилей линий NII  $\lambda$  5667, NII  $\lambda$  5680 и SiIII  $\lambda$  5740. У более слабых линий в спектре заметны на глаз вариации профилей от спектра к спектру слабо выражены, что связано как с коротким периодом наблюдений, так и с малой амплитудой самих изменений профилей.

На диаграммах заметны регулярные изменения профилей. Видно, что перемещение горбов профиля (более темных областей) происходит от красного к фиолетовому крылу профиля. Такой характер вариаций профилей характерен для нерадиальных пульсаций квадрупольной моды  $(l, m) = (2, 2)$  [16].

Похожие вариации профилей найдены и для спектров, полученных в БОАО. На рис. 4 показаны динамические изменения профилей линий в спектре  $\rho$ Leo, построенные по всем наблюдениям звезды. Ввиду меньшего количества спектров, полученных на 1.8-м телескопе БОАО, и больших интервалов между спектрами, полученными в отдельные ночи, эти вариации менее наглядны.

### 3.3. Поиск регулярных вариаций профилей линий

С целью поиска регулярных компонентов вариаций профилей линий в спектре  $\rho$ Leo нами был выполнен фурье-анализ переменной профилей. Для очистки фурье-спектра от ложных пиков использовался алгоритм CLEAN [31] в модификации, описанной в [32, 33]. Для каждой из изучаемых линий были построены временные ряды величин  $\Delta F(t, V)$  — разностных потоков для заданного профиля в момент времени  $t$  при значении  $V$  доплеровского смещения от центра профиля в системе центра масс.

Процедура CLEAN применялась для всех полученных значений  $V$  вдоль профиля исследуемых линий. Фурье-анализ вариаций профилей линий выполнялся в два этапа. На первом этапе анализировались спектры, полученные на БТА 10/11 января 2004 г., на втором — все спектры, полученные в 2004 г.

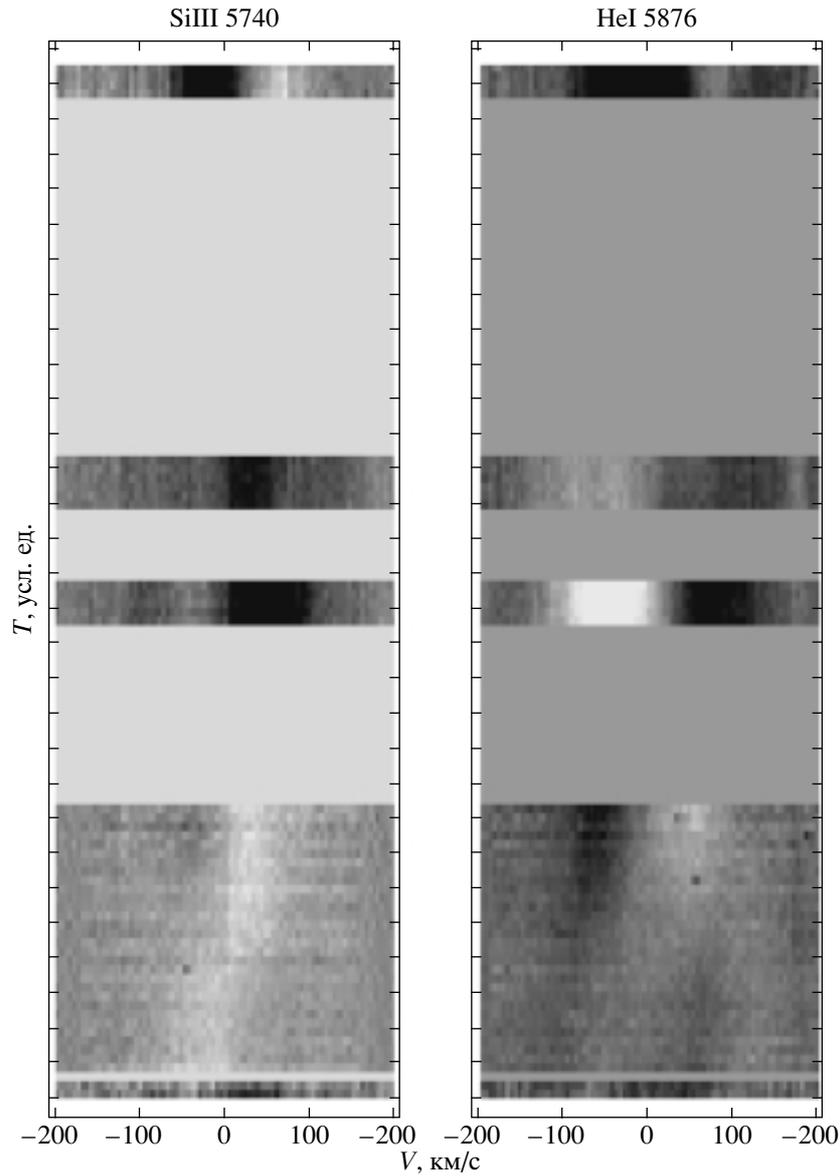
**3.3.1. Фурье-анализ наблюдений на БТА.** На рис. 5 для всех исследованных нами линий представлены контурные графики квадрата модуля амплитуды фурье-преобразования (фурье-спектры мощности), построенные с использованием только 30 спектров, полученных на БТА. При построении спектра мощности фурье-преобразования (периодограммы) для наглядности отбрасывались все значения, соответствующие малому уровню значимости  $q < 10^{-3}$  гипотезы о присутствии сильного пика белого шума в периодограмме. Тем самым на графиках представлены только значимые компоненты периодограммы.

На рисунке видно присутствие широкого пика на частоте  $\nu \approx 4.7 \text{ сут}^{-1}$ . Большая ширина пика связана с относительно низким разрешением фурье-спектра из-за малой длительности периода наблюдений  $T$ . Точность определения частоты гармонического компонента  $\Delta\nu \approx 1/T$ , а величина  $P = 1/\nu \approx 5.1^h$  больше длительности периода наблюдений, поэтому ее нельзя прямо отождествить с периодом регулярных вариаций профилей. Поэтому назовем эту величину *квазипериодом* регулярных вариаций профилей.

**3.3.2. Фурье-анализ всех наблюдений.** При построении полного фурье-спектра вариаций профилей мы дополнительно использовали 17 наблюдений, полученных в БОАО. Полная длительность всех наблюдений составляет 24.8 дня, что дает значение  $\Delta\nu = 1/T \approx 0.04 \text{ сут}^{-1}$ . Наши оценки показали, что реальная точность определения периода ниже и составляет  $\approx 0.1 \text{ сут}^{-1}$ , что связано с наличием большого промежутка  $\approx 21$  день между основным массивом наблюдений и последними четырьмя спектрами, полученными в БОАО 5 февраля 2004 г.

На рис. 6 представлены контурные графики квадрата модуля амплитуды фурье-преобразования всех исследованных нами линий NII, SiIII и HeI, построенные с использованием всех 47 спектров, полученных в САО и БОАО в 2004 г. Из-за больших пропусков во временных рядах для устранения ложных пиков использовался алгоритм CLEAN. При расчетах использовалось значение уровня значимости  $q = 10^{-3}$  гипотезы о присутствии сильного пика белого шума в периодограмме.

В рассчитанных периодограммах присутствует несколько десятков отдельных пиков. Однако только в промежутке частот  $\nu = 0.1 - 6.5 \text{ сут}^{-1}$



**Рис. 4.** То же, что на рис. 3, для динамических спектров вариаций профилей линий SiIII  $\lambda$  5739.73 и HeI  $\lambda$  5876 за весь период наблюдений. Промежутки между наблюдениями в разные ночи показаны областями серого цвета (не в масштабе).

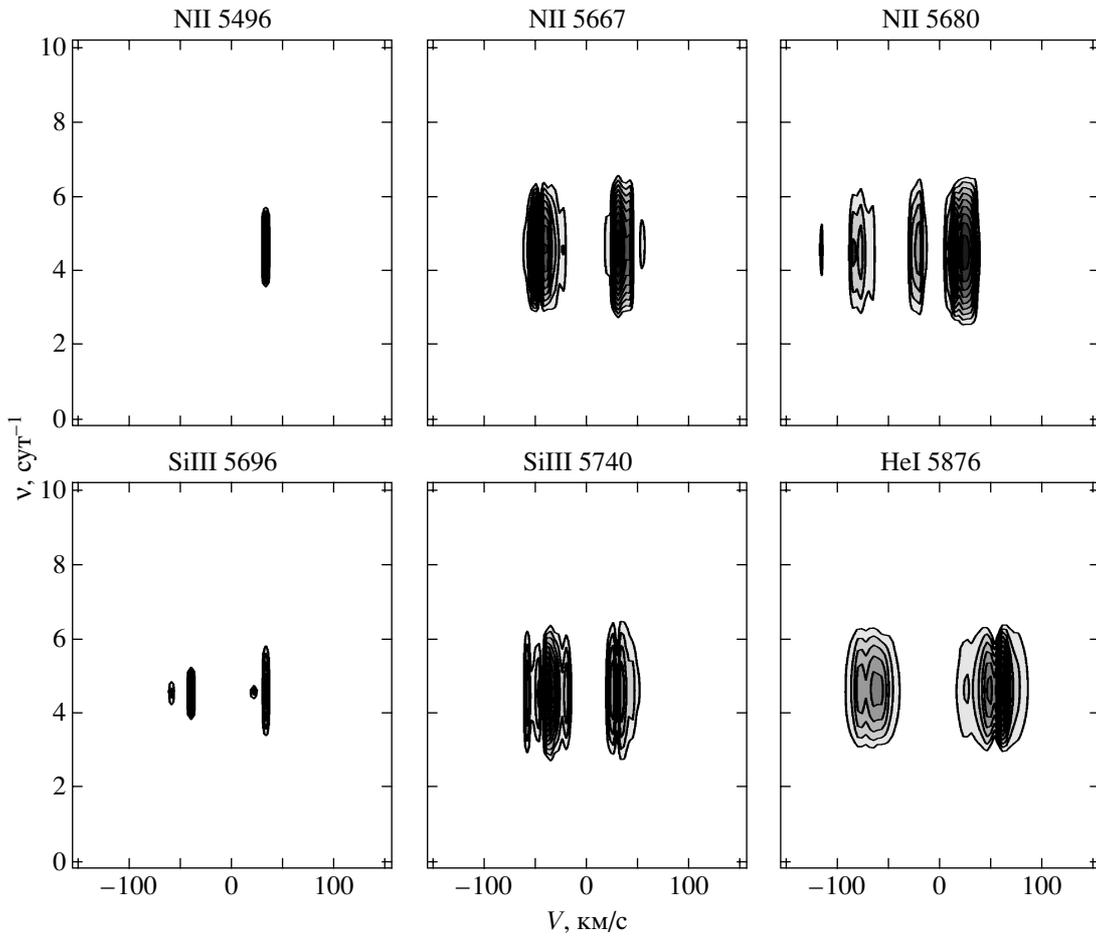
найлены значимые на уровне  $q < 10^{-3}$  компоненты. Определенные частоты гармонических компонентов даны в табл. 3. В таблицу включены только те компоненты спектра мощности фурье-преобразования, которые присутствуют в вариациях профилей *не менее двух линий* в спектре  $\rho$ Leo.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненный нами анализ показывает возможность присутствия регулярных изменений профилей линий в спектре системы  $\rho$ Leo с периодами от  $\approx 7$  сут до  $P = 4-6$  ч. Столь сильное различие периодов наводит на мысль, что обнаруженные вариации профилей имеют разную природу.

Обращаясь к данным табл. 3, можно разделить найденные частоты регулярных вариаций профилей на три группы. К первой группе отнесем частоту  $\nu_1 \approx 0.14 \text{ сут}^{-1}$ . Вторая группа включает частоты  $\nu_2 - \nu_5$ , а к третьей группе отнесем частоты  $\nu_7, \nu_8$  и  $\nu_{10}$ .

Частота  $\nu_1$  соответствует периоду вращения звезды  $P_1 = 7^d \pm 2^d$ . Принимая значение  $R_* \approx 35 R_\odot$ , среднее значение радиуса  $\rho$ Leo — из представленных в табл. 1 данных и значение  $V \sin i = 75 \text{ км/с}$  (табл. 1), найдем верхнюю границу периода вращения звезды:  $P_{rot} \leq 47^d$ . Значение  $P_1$  значительно больше возможных периодов пульсаций звезд спектрального класса B1 [20],



**Рис. 5.** Фурье-спектры вариаций разностных профилей линий NII  $\lambda$  5495.67, NII  $\lambda$  5666.63, NII  $\lambda$  5679.56, SiIII  $\lambda$  5695.52, SiIII  $\lambda$  5739.73 и HeI  $\lambda$  5876 в спектре звезды  $\rho$ Leo в области частот  $\nu = 0-10 \text{ сут}^{-1}$  по наблюдениям, выполненным 10/11 января 2004 г. на БТА. Представлены только значения амплитуды фурье-спектров, соответствующие уровню значимости гипотезы о присутствии сильного пика в периодограмме белого шума  $q < 10^{-3}$ . Более темные области на диаграммах соответствуют большим значениям амплитуды.

поэтому значение  $P_1$  мы можем, вероятнее всего, связать с периодом вращения звезды  $P_{rot}$ .

Можно сделать предварительный вывод, что либо величина  $P_1$  равна периоду вращения, либо значение периода вращения кратно величине  $P_1$  в том случае, если  $\nu_1$  является обертоном частоты вращения звезды. Величина  $P_{rot} \approx 14^d$  в случае, если значение  $\nu_1$  является первым обертоном частоты вращения звезды,  $P_{rot} \approx 21^d$ , если  $\nu_1$  — второй обертоном и т.д. Периоды вращения в промежутке от  $\approx 3^d-4^d$  до  $\approx 20^d$  типичны для звезд поздних подклассов спектрального класса O и ранних подклассов спектрального класса [6, 8, 17].

Обратимся ко второй группе частот  $\nu_2 - \nu_5$ , соответствующих периодам 0.6–1.8 сут. Отметим прежде всего, что в пределах точности определения частот гармонических компонентов  $\nu_4 \approx 2\nu_2$ , а  $\nu_5 \approx 2\nu_3$ , поэтому компоненты  $\nu_4$  и  $\nu_5$  могут быть

обертонами частот  $\nu_2$  и  $\nu_3$ , соответственно. Поэтому сконцентрируемся на анализе частот  $\nu_2$  и  $\nu_3$ .

Причиной быстрых вариаций профилей линий с периодами 1–2 сут может быть вращательная модуляция профилей [1, 2]. В модели [1] считается, что в расширяющихся атмосферах горячих звезд ранних спектральных классов присутствуют коротационные струи вещества, вращающиеся с угловой скоростью звезды. Дополнительное поглощение излучения звезды при появлении этих струй на луче зрения вызывает регулярные вариации профилей линий. Период таких изменений будет равен  $P_n = P_{rot}/n$ , где  $n$  — количество коротационных струй. Периоды вариаций профилей  $P_2 = 1.8^d$  и  $P_3 = 1.1^d$  соответствуют значениям  $n = 4$  и  $n = 6$ , что, в принципе представляется возможным, если период вращения звезды  $P_{rot} \approx 7^d$ .

В то же время нельзя заранее исключить возможность пульсационной природы вариаций про-

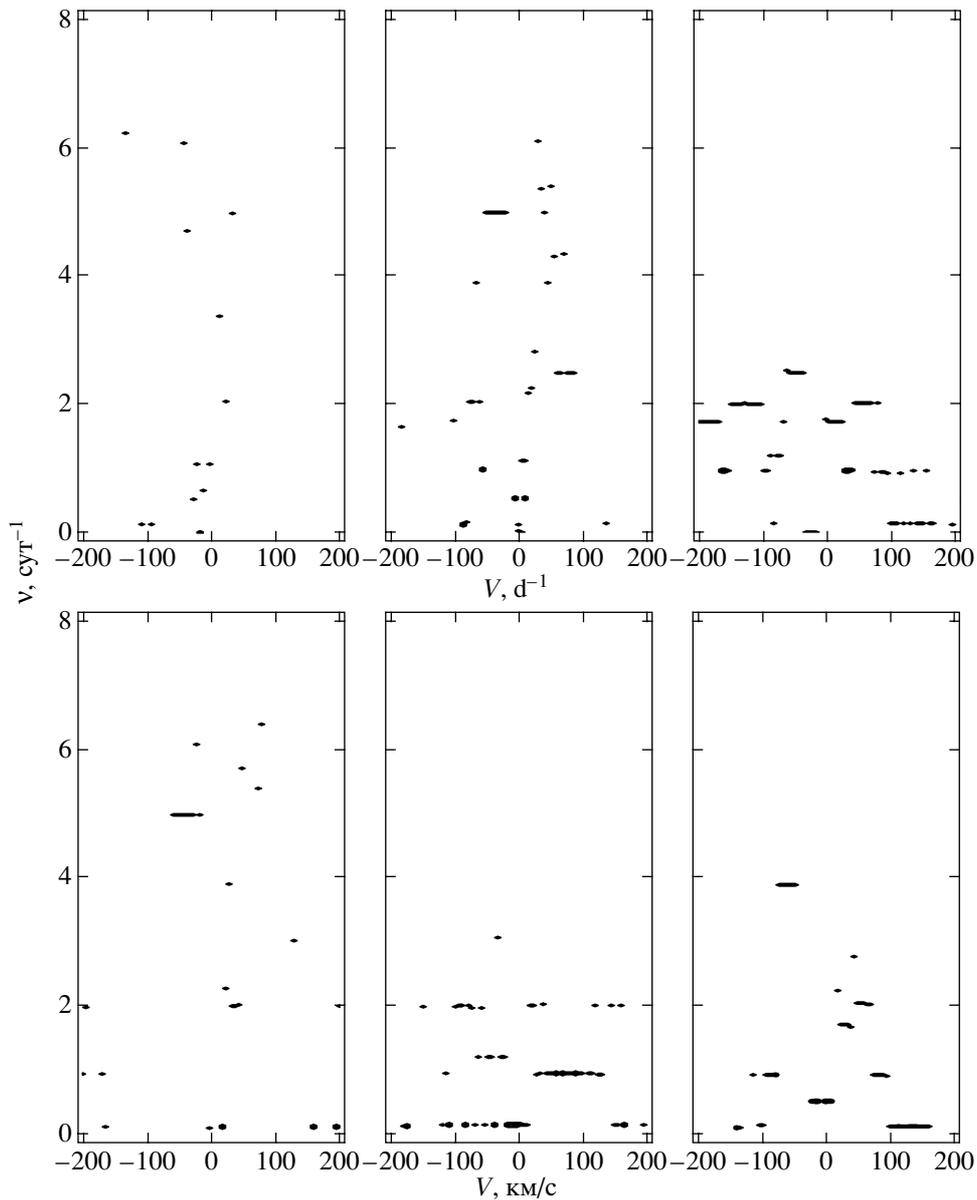


Рис. 6. То же, что на рис. 5, в области частот  $\nu = 0-8 \text{ сут}^{-1}$  по наблюдениям в САО и БОАО в январе и феврале 2004 г.

фиблей с частотами из второй группы. Для проверки этого предположения нанесем (рис. 7) частоты вариаций профилей второй группы на диаграмму  $T_{eff} - P$ , где  $P$  — период квадрупольных ( $l = 2$ ) пульсаций горячих звезд главной последовательности [20, рис. 6]. Найденные частоты при  $T_{eff} = 24200 \text{ К}$  находятся вне области пульсационной неустойчивости ОВ-звезд, что делает гипотезу о пульсациях звезды как о причине вариаций профилей с указанными частотами при данном значении температуры маловероятной. При  $T_{eff} = 20260 \text{ К}$  найденные частоты попадают в область высоких  $g$ -мод квадрупольных пульсаций. В то же время данные частоты относятся к звездам главной

последовательности с массами  $M \leq 10 M_{\odot}$ , что существенно ниже приведенного в [17] значения.

Третья группа регулярных частот вариаций профилей  $\nu_7, \nu_8$  и  $\nu_{10}$  соответствует периодам  $P$  вариаций от  $\approx 4^{\text{h}}$  до  $\approx 6^{\text{h}}$ . Такие значения  $P$  характерны для вариаций профилей в результате НРП ОВ-звезд [5].

Мода  $(l, m)$  НРП может быть определена из соотношения  $l \approx 0.1 + 1.09|\Delta\phi_0|/\pi$  и  $m \approx 1.33 + 0.54|\Delta\phi_1|/2\pi$ , где  $\Delta\phi_0 = \varphi_{red} - \varphi_{blue}$  — разность фаз фурье-компонентов вариаций профилей для красного ( $\varphi_{red}$ ) и фиолетового ( $\varphi_{blue}$ ) крыльев линии основного компонента  $\nu_0$  НРП. Величина

**Таблица 3.** Частоты ( $\nu$ ) и соответствующие им периоды ( $P$ ) гармоник вариаций профилей линий в спектре  $\rho$ Leo. Для приведенных линий присутствие в периодограмме компонента данной частоты отмечено значком “плюс”. В последней колонке жирный “плюс” означает, что компонент с данной частотой, по-видимому, реален, а значок “двоеточие” означает, что данная гармоника *может* относиться к ложным пикам периодограммы

№	$\nu$ , сут <sup>-1</sup>	$P$	NII	NII	NII	SiIII	SiII	HeI	Статус
			$\lambda$ 5496	$\lambda$ 5667	$\lambda$ 5680	$\lambda$ 5696	$\lambda$ 5740	$\lambda$ 5876	
1	$0.14 \pm 0.1$	$7^d \pm 2^d$	+	+	+	+	+	+	+
2	$0.60 \pm 0.1$	$1.8^d \pm 0.3^d$	+	+	–	–	+	+	+
3	$0.94 \pm 0.1$	$1.1^d \pm 0.1^d$	–	–	+	+	+	+	+
4	$1.15 \pm 0.1$	$21^h \pm 2^h$	–	+	+	–	+	+	+
5	$1.74 \pm 0.1$	$14^h \pm 1^h$	+	+	+	–	–	+	+
6	$2.03 \pm 0.1$	$11.8^h \pm 0.5^h$	+	+	+	+	+	+	:
7	$3.9 \pm 0.1$	$6.1^h \pm 0.2^h$	+	+	–	+	–	+	+
8	$4.4 \pm 0.1$	$5.3^h \pm 0.1^h$	–	+	–	+	–	+	+
9	$5.0 \pm 0.1$	$4.8^h \pm 0.1^h$	+	+	–	+	–	–	:
10	$6.2 \pm 0.1$	$3.8^h \pm 0.1^h$	+	–	–	+	–	–	+

$\Delta\varphi_1$  определена аналогичным образом для первой гармоники вариаций профилей линии  $\nu_1 = 2\nu_0$  [34].

К сожалению, вследствие малой длины исследуемого ряда величины  $\Delta\varphi_0$  и  $\Delta\varphi_1$  не могут быть определены достаточно точно. Значение  $|\Delta\varphi_0|$  для профиля линии HeI  $\lambda$  5876 может быть определено только на интервалах скоростей  $-80 \div -50$  км/с и  $-100 \div -50$  км/с. Экстраполируя разность фаз на этих интервалах на весь промежуток скоростей  $\pm V \sin i$ , получим  $l \geq 2$ .

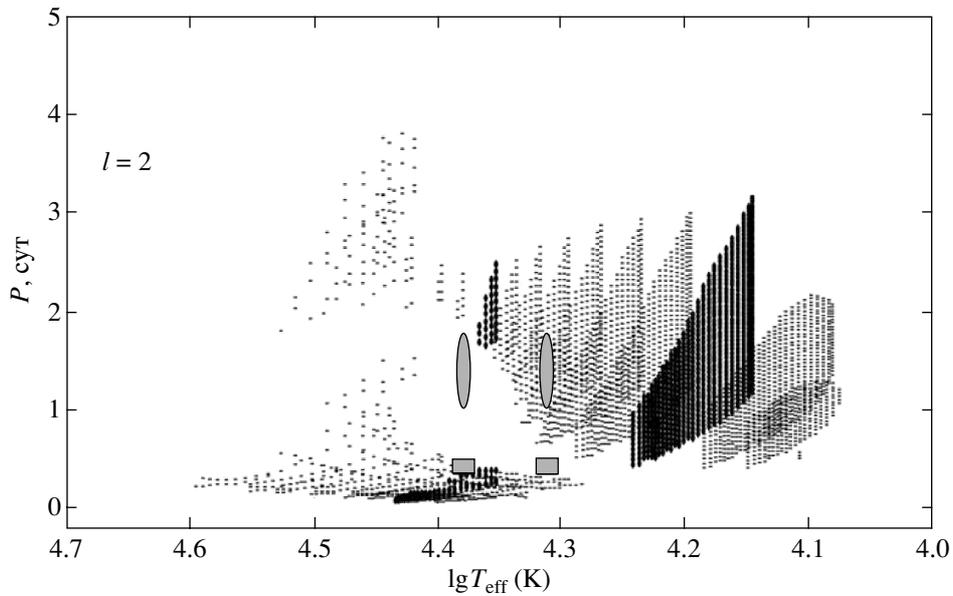
Для выяснения того, насколько найденные периоды вариаций профилей линий в спектре  $\rho$ Leo соответствует возможным периодам пульсаций ОВ-звезд, нанесем положения частот компонентов третьей группы на диаграмму  $T_{eff}-P$ . Представленные на рис. 7 положения гармонических компонентов при  $T_{eff} = 24200$  К находятся в области пульсационной неустойчивости звезд типа  $\beta$ Сер. В то же время положения этих же компонентов при  $T_{eff} = 20260$  К лежат вне области возможных частот пульсаций ОВ-звезд (рис. 7).

Таким образом, можно предположить, что одним из возможных объяснений природы вариаций профилей в спектре  $\rho$ Leo является предположение, что  $T_{eff}$  близко к значению 24200 К; при этом вариации профилей с частотами из третьей группы ( $4-6$  сут<sup>-1</sup>) связаны с нерадиальными пульсациями звезды в квадрупольной моде. Более медленные вариации с частотами из второй группы, вероятнее всего, возникают вследствие вращательной модуляции профилей.

В то же время такая интерпретация не может рассматриваться как единственно возможная, так как, по-видимому, нельзя непосредственно прилагать теорию, развитую для звезд главной последовательности, к ОВ-сверхгигантам. Кроме того нельзя исключить возможность, что  $\rho$ Leo пульсирует в более высоких модах, чем квадрупольная мода  $l = 2$ . Для более надежного разделения вариаций профилей в спектре  $\rho$ Leo, вызываемых вращательной модуляцией и нерадиальными пульсациями и определения периода вращения звезды нами планируются более длительные наблюдения звезды.

Присутствие магнитного поля существенно меняет картину переменности профилей линий [13]. Одним из следствий наличия у звезды магнитного поля является образование квазирегулярных структур (коротационных струй) в ее атмосфере [1, 2]. До настоящего времени поиск магнитного поля  $\rho$ Leo не дал результатов [35]. В то же время проведенный нами выше анализ вариаций профилей линий показывает, что регулярные вариации профилей выходят за границу полосы  $\pm V \sin i = \pm 60$  км/с (рис. 3, 6). В присутствии магнитного поля нерадиальные фотосферные пульсации могут формировать регулярные флуктуации плотности ветра звезды, приводящие к регулярной переменности профилей вне полосы  $\pm V \sin i$  [36].

Сделанные нами оценки показывают, что вплоть до  $\approx 2R_*$ , где  $R_*$  — радиус звезды, магнитное давление  $B^2/8\pi$  будет больше газового при умеренном значении  $B \approx 100$  Гс. В этом случае регуляр-



**Рис. 7.** Периоды пульсаций звезд типа  $\beta$ Сер и медленно пульсирующих В-звезд (SPB) в области эффективных температур  $10^4 - 5 \times 10^4$  К (точки) согласно расчетам [20]. Верхняя область периодов относится к  $g$ -модам пульсаций SPB-звезд, нижняя — к пульсациям массивных звезд типа  $\beta$ Сер в квадрупольной моде ( $l = 2$ ). Серыми прямоугольниками и овалами показаны определенные нами частоты регулярных вариаций профилей в спектре  $\rho$ Leo. Овалы — область частот  $0.60 - 0.94 \text{ сут}^{-1}$  (периоды  $P = 1.06 - 1.67 \text{ сут}$ ), прямоугольники — область частот  $3.9 - 6.2 \text{ сут}^{-1}$  (периоды  $P = 0.16 - 0.26 \text{ сут}$ ) регулярных компонентов вариаций профилей в спектре  $\rho$ Leo. Левые прямоугольник и овал соответствуют значениям  $T_{eff} = 24200 \text{ К}$ , правые —  $T_{eff} = 20260 \text{ К}$ .

ная переменность профилей будет прослеживаться до  $\pm 2V \sin i$ , в соответствии с наблюдаемой картиной переменности профилей. Отметим также, что значение  $V \sin i$ , данное в табл. 2, может быть заниженным. В следующей статье данной серии нами будет представлен анализ поляризационных наблюдений  $\rho$ Leo, выполненных на БТА в 2005–2006 гг., и сделаны оценки напряженности магнитного поля звезды.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных нами наблюдений звезды  $\rho$ Leo и анализа вариаций профилей линий NII  $\lambda$  5495.67, NII  $\lambda$  5666.63, NII  $\lambda$  5679.56, Si-III  $\lambda$  5696, SiII  $\lambda$  5739.73 и HeI  $\lambda$  5876 можно сделать следующие выводы:

1. Все исследованные линии имеют переменные профили. Амплитуда переменности составляет 0.5%–1%.

2. В вариациях профилей линий, возможно, присутствуют регулярные компоненты с характерными временами от  $\approx 3^{\text{д}}$  до  $6^{\text{ч}}$ .

3. Компонент с периодом  $\approx 7^{\text{д}} \pm 2^{\text{д}}$  связан, вероятнее всего, с вращением звезды, а регулярные компоненты с периодами  $P = 0.6^{\text{д}} - 1.8^{\text{д}}$ , возможно, объясняются вращательной модуляцией профилей линий.

4. Обнаружены короткопериодические вариации профилей линий с характерными временами  $3.8^{\text{ч}} - 6.1^{\text{ч}}$ . Высказано предположение, что эти компоненты соответствуют нерадиальным пульсациям звезды с мультипольностью  $l \geq 2$ .

Работа поддержана грантом РФФИ 05-02-16995а, грантом Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-8542.2006.2, грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых—кандидатов наук МК-874.2004.2. Г.Г.В. признателен фонду Министерства науки и технологий Южной Кореи (Korea MOST) за поддержку грантом M1-0222-00-0005 и Южнокорейскому научно-техническому обществу (KOFST) за финансовую поддержку по программе KASI (Brain Pool program).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Kaper, H. F. Henrichs, A. W. Fullerton, H. Ando, et al., *Astron. and Astrophys.* **327**, 281 (1997).
2. L. Kaper, H. F. Henrichs, J. S. Nichols, J. H. Telting, et al., *Astron. and Astrophys.* **344**, 231 (1999).
3. A. Kaufer, O. Stahl, B. Wolf, et al., *Astron. and Astrophys.* **305**, 887 (1996).
4. S. Lépine, A. F.J. Moffat, *Astrophys. J.* **514**, 909 (1999).

5. J. A.de Jong, H. F. Henrichs, S. Schrijvers, et al., *Astron. and Astrophys.* **345**, 172 (1999).
6. J. A.de Jong, H. F. Henrichs, L. Kaper, et al., *Astron. and Astrophys.* **368**, 601 (2001).
7. S. M. Kahn, M. A. Leutenegger, J. Cottam, et al., *Astron. and Astrophys.* **365**, 365 (2001).
8. N. A. Miller, J. P. Cassinelli, J. J. MacFarlane, D. H. Cohen, *Astroph. J.* **499**, L195 (2002).
9. А. Ф. Холтыгин, Д. Н. Монин, А. Е. Сурков, С. Н. Фабрика, *Письма в Астрон. журн.* **29**, 208 (2003).
10. J.-F. Donati, G. A. Wade, J. Babel, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **326**, 1265 (2001).
11. J.-F. Donati, J. Babel, T. J. Harries, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **333**, 55 (2002).
12. J.-F. Donati, I. D. Howarth, J.-C. Bouret, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **365**, L6 (2006).
13. C. Neiner, A. M. Hubert, A. M. Floquet, et al., *Astron. and Astrophys.* **388**, 899 (2002).
14. A. F. Kholtygin, J. Brown, S. Fabrika, and A. Surkov, in: *Magnetic Stars*, Proc. Intern. Conf., Nizhnij Arkhyz, August 27–31, 2003, eds Yu. V. Glagolevskij, D. O. Kydryavtsev, I. I. Romanyuk (SAO RAN, 2004), p. 250.
15. А. Ф. Холтыгин, Г. Галазутдинов, Т. Е. Бурлакова и др., *Астрон. журн.* **83**, 252 (2006).
16. А. Ф. Холтыгин, Т. Е. Бурлакова, С. Н. Фабрика и др., *Астрон. журн.* **83** (2006, в печати).
17. T. Morel, S. V. Marchenko, A. K. Pati, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **351**, 552 (2004).
18. D. R. Gies and D. L. Lambert, *Astrophys. J.* **387**, 673 (1992).
19. P. A. Crowther, D. J. Lennon, and N. R. Walborn, *Astron. and Astrophys.* **446**, 279 (2006).
20. A. A. Pamyatnykh, *Acta Astron.* **49**, 189 (1999).
21. В. Е. Панчук, Н. Е. Пискунов, В. Г. Клочкова и др., *Препринт Специальн. астрофиз. обсерв. №169* (2002).
22. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, И. Д. Найденов, *Препринт Специальн. астрофиз. обсерв. №179* (2003).
23. I. D. Howarth, K. W. Siebert, G. A.J. Hussain, and R. K. Prinja, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **284**, 265 (1997).
24. *SIMBAD Astronomical Database* (Strasbourg Astronomical Data Center), <http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad/>.
25. P. Ballester, *Astron. and Astrophys.* **286**, 1011 (1994).
26. V. S. Shergin, A. Yu. Kniazev, and V. A. Lipovetsky, *Astron. Nachr.* **317**, 95 (1996).
27. *Bohyunsan Echelle Spectrograph* (Bohyunsan Optical Astronomy Observatory, Korea), <http://www.boao.re.kr/BOES/BOESppt3.files/frame.htm>.
28. Г. А. Галазутдинов, *Препринт Специальн. астрофиз. обсерв. №92* (1992).
29. M. Asplund, N. Grevesse, and A. J. Sauval, in: *Cosmic abundances as records of stellar evolution and nucleosynthesis*, Proc. Symp., eds F. Bash, T. Barnes, ASP Conf. Ser. ???, ???; astro/ph/0410214.
30. Th. Rivinius, D. Baade, and S. Stefl, *Astron. and Astrophys.* **411**, 229 (2003).
31. D. H. Roberts, J. Lehar, and J. W. Dreher, *Astron. J.* **93**, 968 (1987).
32. В. В. Витязев, *Анализ неравномерных временных рядов* (СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001).
33. А. Ф. Холтыгин, А. Б. Шнейвайс, *Астрофизика* **48**, 87 (2005).
34. J. H. Telting and C. Schrijvers, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **317**, 723 (1997).
35. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astron. and Astrophys.* **407**, 631B (2003).
36. S. P. Owocki and S. R. Cranmer, in: *Radial and Non-radial Pulsations as Probes of Stellar Physics*, eds C. Aerts, T. R. Bedding, J. Christensen-Dalsgaard, ASP Conf. Ser. **259**, 512 (1988).

@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@

@@@

Bright supergiant  $\rho$ Leo BIII was observed in January–February 2004 on the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatoty (SAO), Russia and on the 1.8-m telescope of the Bohyunsan Optical Astronomy Observatory (Korea). The 47 spectra were taken with a high temporary resolution (4–10 minutes), a signal/noise ratio from 200 to 2000, and with a spectral resolution  $R = 45000–60000$ . Line profile variability in lines HeI, SiII-II and NII was revealed. It was supposed that the variability is connected with rotational modulation and non-radial photospheric pulsations of  $\rho$ Leo. The influence of the possible magnetic field of the star on the line profile variations is discussed.