

СВЕРХБЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ ρ Leo: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2020 г. А. Ф. Холтыгин^{1,2*}, Н. П. Иконникова², А. В. Додин², О. А. Циопа³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный Астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Главная (Пулковская) обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 03.02.2020 г.

После доработки 24.02.2020 г.; принята к публикации 25.02.2020 г.

Представлены результаты наблюдений сверхвысокого временного разрешения ($\Delta T \sim 12$ с) В1аб сверхгиганта ρ Leo на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ. Обнаружены регулярные вариации профилей линий с периодами 15–30 мин. Детектированы значительные изменения средних профилей линий на промежутках времени 1–3 дня. Приводятся свидетельства в пользу существования коротко-периодических вариаций профилей линий на шкалах времени 15–25 мин. Обсуждается природа коротко-периодических вариаций профилей линий. Отмечена возможность изучения быстрых вариаций профилей широких линий (главным образом Бальмеровских линий водорода и линий HeI) при использовании спектрографов низкого разрешения с $R = 1000$ – 2000 на 1–2-метровых телескопах.

Ключевые слова: звезды — индивидуальные, ρ Leo — спектры, профили линий — переменность.

DOI: 10.31857/S032001082003002X

ВВЕДЕНИЕ

Профили линий в спектрах ОВА звезд переменны на временных шкалах от дней до часов (Капер, 1997; Холтыгин и др., 2003; Душин и др., 2013). Вариации профилей на минутных шкалах времени до последнего времени не были известны. Впервые Хубриг и др. (2014) обнаружили изменения профилей линий Si II и Fe II в спектрах A0 сверхгиганта HD 92207 на промежутках времени 1–2 мин.

Эта работа стимулировала наши исследования сверхбыстрой переменности (на минутных и секундных шкалах) в спектрах звезд ранних спектральных классов. Чтобы проверить, широко ли распространены короткопериодические спектральные вариации среди ОВА-звезд, мы проанализировали вариации профилей линий в спектрах ряда ОВА-звезд, полученных с высоким (минута и меньше) временным разрешением при использовании редуктора светосилы 6-м телескопа БТА SCORPIO (Афанасьев, Моисеев, 2005).

Холтыгин и др. (2017) представили результаты анализа сверхбыстрой переменности в спектре звезды HD 93521 (O9.5III) по наблюдениям на

БТА в 2015 г. Были обнаружены регулярные вариации профилей линий с периодами 4–5 и 32–36 мин. Результаты поиска быстрых вариаций в спектрах химически пекулярной A0VpSiEu звезды α^2 CVn описаны Холтыгиным и др. (2020).

Анализ спектральной переменности Ве звезды λ Eg по наблюдениям на ESO VLT со спектрографом FORS 1/2 представлен Хубриг и др. (2017). Обзор выполненных по программе поиска сверхбыстрых вариаций профилей линий в спектрах ОВА-звезд представлен в статье Циопы и др. (2020).

Исследование сверхбыстрой переменности профилей линий в спектрах звезд ранних классов требует анализа спектров большого числа ОВА-звезд разных типов, что, в свою очередь, связано с получением большого объема наблюдательного времени. Ввиду загруженности больших телескопов целесообразно изучить возможность получения спектров ОВА звезд на телескопах меньшего диаметра. Одним из подходящих инструментов для реализации указанного подхода является 1.25-м телескоп ЗТЭ Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ, оснащенный спектрографом низкого

*Электронный адрес: afkholtygin@gmail.com

Таблица 1. Параметры ρ Leo

Параметр	Значение	Ссылка
T_{eff} , К	23 500	Костенков и др. (2020)
$\lg g$	2.88	Костенков и др. (2020)
M/M_{\odot}	28	Костенков и др. (2020)
R/R_{\odot}	31	Костенков и др. (2020)
V_{∞}	1110	Кроузе и др. (2006); Ховарт и др. (1997)
$-\lg \dot{M}/M_{\odot}$	-5.8–6.0	Костенков и др. (2020)
$\lg L/L_{\odot}$	5.45	Костенков и др. (2020)
$V \sin i$, км/с	49	Симон-Диаз и Херреро (2014)
P_{rot} , дней	26.8	Аэртс и др. (2018)
{C}	7.5	Кроузе и др. (2006)
{N}	8.3	Кроузе и др. (2006)
{O}	8.4	Кроузе и др. (2006)

разрешения (FWHM $\sim 7.5 \text{ \AA}$), позволяющим получать спектры в области 4200–7200 \AA .

В качестве первого объекта изучения переменности профилей линий с помощью 1.25-м телескопа был выбран V11ab сверхгигант ρ Leo. Данная звезда является одним из наиболее ярких объектов в списке программных звезд Холтыгина и др. (2003) для изучения быстрой переменности линий, что позволяет достичь отношения сигнал/шум >500 при экспозициях менее 1 мин на телескопах умеренного диаметра, к которым относится и 1.25-м телескоп.

Звезда ρ Leo наблюдалась на БТА в январе-феврале 2004 г. и на 1.8-м телескопе Бохинсанской оптической астрономической обсерватории в Южной Корее (Холтыгин и др., 2007а). Получено 47 спектров звезды с временным разрешением 4–10 мин, отношением сигнал/шум от 300 до 700 и спектральным разрешением от 45 000 до 60 000. Обнаружена переменность профилей бальмеровских линий водорода, линий HeI, SiII, SiIII и NiI. Детектированы регулярные компоненты переменности профилей линий с периодами от 3.8^h до 1.8^d. Переменность профилей может быть интерпретирована как результат их вращательной модуляции и нерадиальных фотосферных пульсаций.

Звезда ρ Leo включена в программу исследования магнитных полей ярких звезд северного неба (Монин и др., 2002; Холтыгин и др., 2010). В рамках этой программы в 2005 г. были выполнены

наблюдения ρ Leo на БТА с использованием спектрографов NES и ОЗСП с анализатором круговой поляризации (Холтыгин и др., 2007b). Было обнаружено умеренное магнитное поле, которое может быть описано в модели вращающегося магнитного диполя с напряженностью на полюсах 240 ± 50 Гс и углом наклона оси диполя к оси вращения $59^{\circ} \pm 30^{\circ}$.

Выполненные нами наблюдения ρ Leo 19/20 и 20/21.01 2015 г. на БТА с фокальным редуктором SCORPIO со сверхвысоким временным разрешением 6 с анализируются в статье Холтыгина и др. (2018). Сообщается об обнаружении короткопериодических регулярных вариаций профилей линий H и He с периодами от 2 до 90 мин и нерегулярные вариации профилей линий на промежутке времени < 1 мин. Установлено, что периоды вариаций профилей линий в области 2–10 мин являются переменными. Наличие таких компонентов регулярных вариаций профилей линий было объяснено в предположении, что высокие моды нерадиальных пульсаций нестабильны и могут как затухать, так и генерироваться на коротких шкалах времени 10–100 мин.

В настоящей статье представлены результаты анализа 163 спектров ρ Leo, полученных на 1.25-м телескопе в октябре-ноябре 2019 г. Статья организована следующим образом. В разделе 2 представлены основные сведения об изучаемом объекте. Выполненные наблюдения и процедура их обработки описаны в разделе 3. Вариации профилей

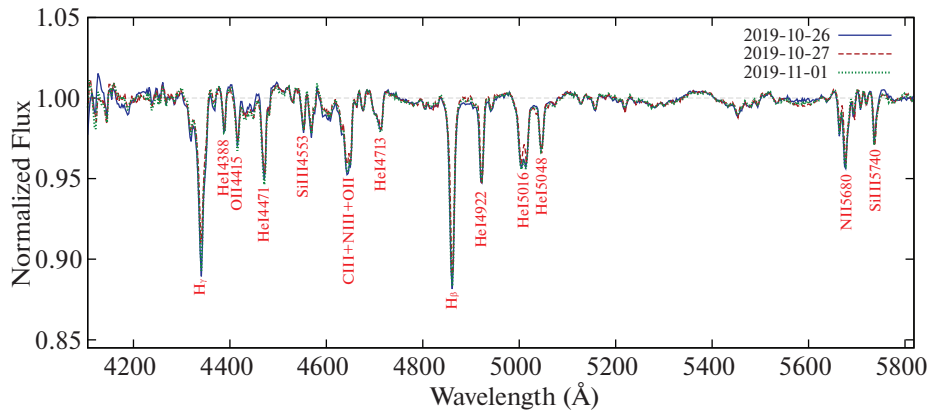


Рис. 1. Нормированные спектры ρ Leo, усредненные по всем индивидуальным спектрам, полученным в ночи 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г.

линий в спектре ρ Leo обсуждаются в разделе 4. Результаты фурье-анализа вариаций профилей линий представлены в разделе 5. В разделе 6 описаны результаты их Вейвлет-анализа. Обсуждение результатов и выводы из настоящего исследования представлены в разделе 7.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ

Сверхгигант ρ Leo (HD 91316) является относительно медленно вращающейся звездой спектрального класса B1ab. Эффективная температура звезды T_{eff} определяется неуверенно: Морел и др. (2004) приводят значение $T_{\text{eff}} = 20\,260$ К, в статье Гисс и др. (1992) по величине бальмеровского скачка и из сравнения профилей водородных линий с модельными указывают значение $24\,200$ К. В результате моделирования спектра звезды с учетом вклада в профили ветра звезды Кроузе и др. (2006) получено значение $T_{\text{eff}} = 22\,000$ К.

Параметры звезды были недавно уточнены в работе Костенкова и др. (2020) при аппроксимации спектров звезды, полученных на БТА с использованием спектрографа СКОРПИО и представленных в статье Холтыгина и др. (2018) модельными спектрами, рассчитанными с использованием не-ЛТР кода CMFGEN Хильера и Миллера (1998).

Таблица 2. Журнал наблюдений ρ Leo

Дата	T_0 (h:m:s), UT	ΔT	N_{sp}
27.10.2019	03:09:30	14.03	70
28.10.2019	02:56:04	23.33	120
02.11.2019	02:52:05	14.12	73

Звезда ρ Leo на диаграмме ГР находится в области переменных звезд типа β Сер ранних подклассов спектрального класса В (см., например, Памятных, 1999). Параметры звезды представлены в табл. 1. В таблице T_{eff} — эффективная температура звезды, M — масса звезды, \dot{M} — темп потери массы звездой, L — болометрическая светимость, V_{∞} — терминальная скорость звездного ветра, $V \sin i$ — скорость вращения звезды, P_{rot} — период вращения. В фигурных скобках приведено содержание элементов в логарифмической шкале.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения ρ Leo были выполнены на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ в 2 ночи 26/28 октября и в ночь 1/2 ноября 2019 г. Все спектры были получены с экспозицией 10 с. В табл. 2 представлен журнал наблюдений ρ Leo. Для трех наблюдательных ночей указаны время начала экспозиции T_0 , полная длительность наблюдений в минутах ΔT и число спектров N_{sp} , полученных за ночь. Все спектры были получены в области $\lambda 4075$ – 5810 Å со спектральным разрешением ~ 1000 .

Наблюдения и первичная стандартная обработка кадров проводились с использованием программы CCDops¹. Одномерные спектры получены путем суммирования отсчетов внутри апертуры в 40 пикселей ($79''$), при среднем FWHM 26 пикселей, с вычитанием фона неба, который брался по области 60–120 пикселей от центра спектра звезды. Отношение сигнал к шуму получаемых спектров составляет 500–600. Калибровка по длинам волн осуществлялась с использованием Ne–Ag лампы.

¹ <http://company7.com/library/sbig/sbwhtmls/ccdopsv5.html>

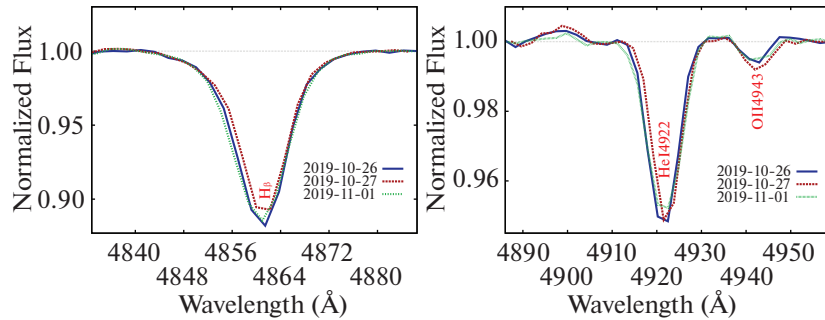


Рис. 2. Средние нормированные профили линий $H\beta$ (слева) и HeI 4922 (справа), полученные в разные ночи наблюдений.

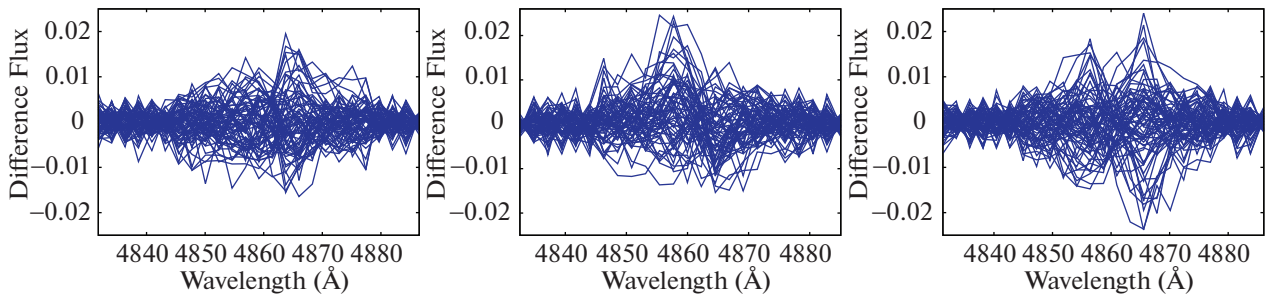


Рис. 3. Разностные спектры вариаций профилей линии $H\beta$ в ночи наблюдений 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. (слева-направо).

Полученные спектры были нормированы на континуум. Процедура нормировки описана в статье Холтыгина и др. (2006). Усредненные за три наблюдательные ночи нормированные спектры представлены на рис. 1. Отличие средних нормированных спектров за разные ночи не превышает 1%, что свидетельствует о корректности используемой процедуры нормировки.

Глубины линий в средних спектрах ρ Leo, представленных на рис. 1, меньше, чем глубины линий в среднем спектре ρ Leo, полученном нами на БТА со спектрографом SCORPIO (рис. 1 в статье Холтыгина и др., 2018) из-за более высокого спектрального разрешения SCORPIO.

ВАРИАЦИИ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

Профили линий, пригодные для анализа их переменности, были нормированы на локальный континуум. Средние нормированные профили линии $H\beta$ и HeI 4922, полученные в разные ночи наблюдений, показаны на рис. 2. Видно, что профили линий меняются от ночи к ночи на 1–2% в единицах интенсивности соседнего с линией континуума. Несмотря на низкое разрешение спектрографа, при усреднении спектров в спектре ρ Leo видны слабые линии, такие как линия OII 4943 на рис. 2 (справа).

Характер переменности профилей линий хорошо виден на рис. 3, на котором приведены разностные профили линий:

$$d(V, t_i) = F(V, t_i) - \overline{F(V)}. \quad (1)$$

Здесь $F(V, t_i)$ — профиль линии в момент времени $t = t_i$, $V = (\lambda - \lambda_0)/c$ — доплеровское смещение от центральной длины волны линии λ_0 , c — скорость света, а $\overline{F(V)}$ — профиль линии, усредненный по всем анализируемым спектрам.

Динамические спектры вариаций профилей линий $H\beta$ и HeI 4922 (отклонения профилей линий от среднего в зависимости от времени начала экспозиции) в ночи наблюдений 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. показаны на рис. 4. Для большей наглядности все спектры представлены в единой шкале времени, соответствующей максимальной длительности $\Delta T_{\max} = 23.33$ мин наблюдений, выполненных 27 октября 2019 г. (см. табл. 2). Как следует из анализа рисунков, характер переменности профилей подобен для разных линий и разных дат наблюдений.

Нерегулярные вариации профилей в центре линий

В спектрах звезды ρ Leo найдены нерегулярные вариации профилей линий на секундных шкалах (Холтыгин и др., 2018). Такого типа вариации профилей линий при наблюдениях на 1.25-м телескопе

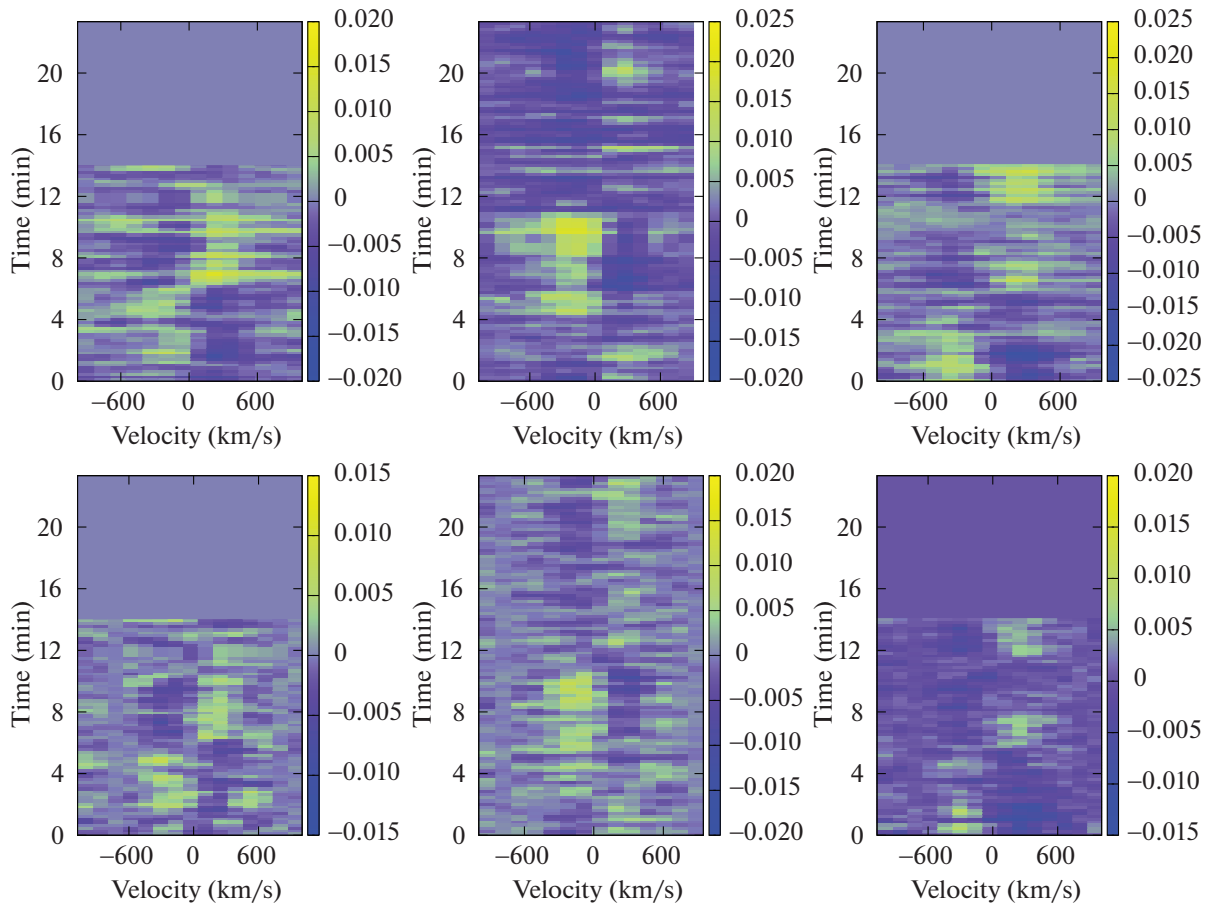


Рис. 4. Динамические спектры вариаций профилей линий $H\beta$ (вверху) и HeI 4922 (внизу) в ночи наблюдений 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. (слева-направо).

не обнаружено. Это может быть связано как с тем, что нерегулярные вариации профилей линий являются достаточно редкими событиями, так и с тем, что отношение сигнал/шум в анализируемых в настоящей работе спектрах ($\sim 500\text{--}600$) ниже, чем в спектрах, изучаемых в работе Холтыгина и др. (2018).

ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

Для поиска периодических компонент в вариациях профилей линий был выполнен фурье-анализ разностных профилей линий в спектре ρ Leo. Для каждой точки на профиле линии, характеризующейся каким-либо значением доплеровского смещения $V = V_k$, совокупность значений $\{d(V_k, t_i)\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, где N — число анализируемых профилей, представляет собой анализируемый временной ряд.

Для поиска регулярных компонент каждого из таких рядов для всех значений V_k в пределах профиля линии был использован метод CLEAN (Робертс и др., 1987) с учетом результатов анализа

временных рядов с большими пропусками (Холтыгин и др., 2007с). В силу низкого разрешения спектрографа (разрешение по скорости $\Delta V \approx 140$ км/с) для фурье-анализа следует выбирать достаточно широкие линии. К таковым относятся, как видно из рис. 1, линии $H\gamma$, $H\beta$, HeI 4471 и HeI 4922.

В дальнейшем будем анализировать именно эти линии. На рис. 5 представлены фурье-спектры вариаций профилей линий в спектре ρ Leo для уровня значимости $\alpha = 10^{-3}$ отдельно для каждой ночи наблюдений. На рис. 6 демонстрируется подобие фурье-спектров всех анализируемых линий.

В фурье-спектре присутствуют регулярные компоненты с частотами, соответствующими максимумам амплитуды фурье-спектра, которые превышают значение, соответствующее выбранному уровню значимости. В табл. 3 представлены найденные частоты и периоды возможных гармонических компонент вариаций профилей анализируемых линий.

Знак + указывает, что соответствующая компонента присутствует в фурье-спектре, а знак — то, что на данном уровне значимости он не обнаружен,

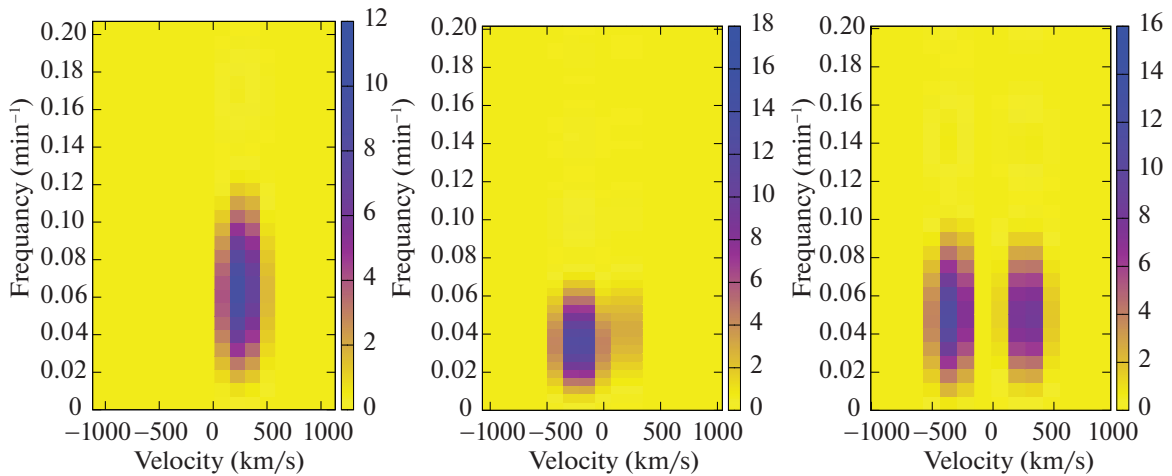


Рис. 5. Фурье-спектры вариаций профилей линий $H\beta$ для ночей наблюдений 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. (слева-направо).

хотя при большем уровне значимости он может быть зарегистрирован. Компоненты ν_1 и ν_4 присутствуют в фурье-спектре только линии $H\beta$, поэтому реальность этих компонент пока не очевидна. Для решения вопроса об их реальности необходимы более длительные наблюдения.

Компонента ν_3 соответствует периоду $P = 24.9$ мин, который превосходит максимальную длительность всех анализируемых сетов наблюдений в ночь 28 октября 2019 г. ($\Delta T = 23.33$ мин).

Оставшаяся компонента $\nu_2 = 18.5 \text{ мин}^{-1}$ может быть реальна. В то же время, как следует из анализа рис. 5 и 6, ошибки в определении частот периодических компонент, определяемые шириной лепестков графиков плотности фурье-спектра, весьма велики.

Верхние пределы ошибок частот компонент фурье-спектра могут быть оценены из соотношения $\Delta\nu \leq 1/\Delta T$, где ΔT — полное время наблюдений данного сета, приведенное в табл. 2 (см., например, Витязев, 2001) и находятся в промежутке $[0.04-0.07] \text{ мин}^{-1}$. С учетом ошибок частоты компоненты ν_2 она может быть первой гармоникой компоненты $\nu = 0.031 \text{ мин}^{-1}$,

Таблица 3. Частоты и периоды регулярных компонент вариаций профилей в спектре $\rho \text{ Leo}$

№.	ν , 1/мин	P , мин	$H\beta$	$H\gamma$	HeI 4471	HeI 4922
1	0.067	14.9	+	—	—	—
2	0.054	18.5	+	+	+	+
3	0.040	24.9	+	+	+	+
4	0.048	21.0	+	—	—	—

обнаруженной в вариациях профилей линий в спектре $\rho \text{ Leo}$ Холтыгиным и др. (2018). Выяснение природы этой компоненты требует проведения более длительных наблюдений.

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

Анализ разностных профилей линий в спектрах $\rho \text{ Leo}$ (рис. 3) показывает присутствие в них дискретных компонент. Мелкомасштабные детали профилей, вероятно, связаны с шумовой компонентой профилей, а детали больших масштабов могут относиться как к регулярной, так и нерегулярной компонентам вариаций профилей. Наиболее подходящим математическим аппаратом для исследования образования и эволюции деталей профилей разных масштабов является вейвлет-анализ с анализирующим МНАТ-вейвлетом:

$$\psi(x) = (1-x^2) \exp(-x^2/2), \quad (2)$$

с узким энергетическим спектром и равными нулю первым и нулевым моментами.

Используя этот вейвлет, интегральное вейвлет-преобразование разностного профиля линии можно записать в следующем виде (Астафьева, 1996; Короновский, Храмов, 2003):

$$W(s, V, t) = \frac{1}{s^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} d(V', t) \psi\left(\frac{V-V'}{s}\right) dV', \quad (3)$$

где $d(V, t)$ — исследуемая функция (разностный профиль линии), полученная в момент времени t в пространстве скоростей V .

Плотность энергии сигнала $E(s, V, t) = W^2(s, V)$ характеризует распределение энергии исследуемого сигнала в пространстве $(s, V) = (\text{масштаб},$

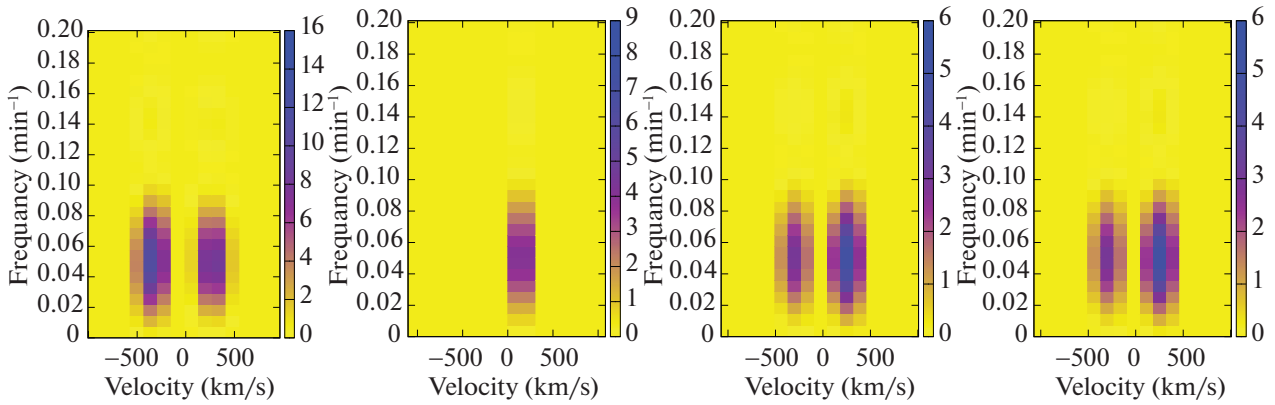


Рис. 6. Фурье-спектры вариации профилей линий Hβ, Hγ, HeI 4471 и HeI 4922 (слева-направо) для ночи наблюдений 1/2 ноября 2019 г.

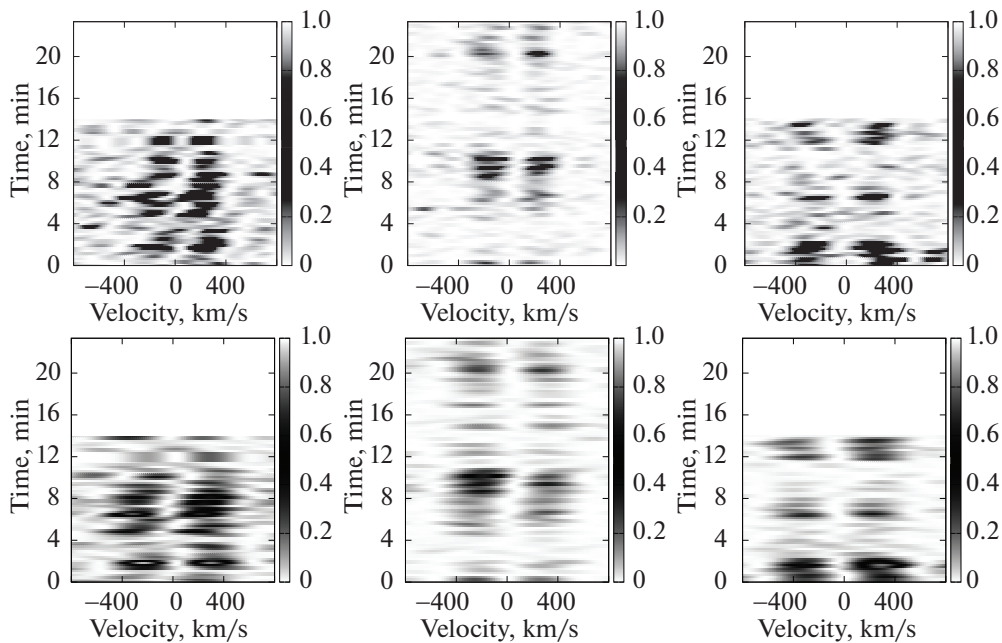


Рис. 7. Динамический вейвлет-спектр вариации профилей линии Hβ с МНАТ материнским вейвлетом на масштабах $S = 120$ км/с (вверху), и $S = 240$ км/с (внизу) для спектров, полученных 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. (слева-направо).

координата) в момент времени t . В этом случае масштабная переменная s выражается в км/с.

Для изучения эволюции деталей разностных профилей нами были рассчитаны величины $E(s, V, t) = W^2(s, V, t)$ для бальмеровских линий для всех моментов времени t , в которые получены спектры звезды в наблюдательные ночи 26–28.10.2019 и 1.11.2019. Совокупность функций $E(s, V, t)$ для фиксированных масштабов s назовем *динамическим вейвлет-спектром* вариаций профиля рассматриваемой линии в спектре звезды.

Настоящее определение динамического вейвлет-спектра отличается от принятого в статье Холтыгина и др. (2006), в которой анализировались

непосредственно значения амплитуд вейвлет-преобразования $W(s, V, t)$. На рис. 7 представлены динамические вейвлет-спектры линии Hβ в спектрах ρ Leo, полученных 27.10.2019, 28.10.2019 и 02.11.2019. Из анализа рисунка видно, что характер вариаций для спектров, полученных в разные ночи, подобен.

На относительно малых масштабах $s \leq 50$ км/с, меньше спектрального разрешения, в вейвлет вариациях профилей виден главным образом вклад шумовой компоненты профиля. В то же время на больших масштабах $s \geq 120$ км/с (близко к разрешению спектрографа в пространстве скоростей)

детали вариаций профилей хорошо видны. Наиболее отчетливо характер изменений профилей со временем в динамических вейвлет-спектрах виден на масштабах $s = 240$ км/с.

Для надежного выявления деталей профилей, связанных с неоднородностью звездного ветра ρ Leo, желательно использовать вейвлеты с масштабом, близким к дисперсии скоростей в неоднородностях. Согласно оценкам в статье Кудряшовой и Холтыгина (2001), дисперсия скоростей ~ 140 км/с соответствует размеру неоднородностей $\sim 1.4R_{\odot}$, что составляет $0.04R_*$, где R_* — радиус ρ Leo. Формирование неоднородностей такого размера в ветре ρ Leo вполне возможно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

К настоящему времени по программе поиска сверхбыстрой переменности профилей линий нами получены и проанализированы спектры 6 звезд: HD 93521 (O9Vp), ρ Leo (B1Iab), λ Eri (B2III), HD92207 (A0Ia), α^2 CVn (A0Vp) и γ UMi (A2III).

Хотя число исследованных объектов мало, можно сделать предварительные выводы о характере переменности профилей линий в спектрах звезд разных спектральных классов, основываясь на результатах работы Циопы и др. (2020) и настоящей работы. Прежде всего отметим уменьшение периодов быстрых вариаций профилей линий в спектрах при переходе от O-звезд к звездам спектрального класса A. Самые быстрые изменения профилей линий с периодами 3–5 мин обнаружены у O-сверхгиганта HD 93521, тогда как периоды быстрых вариаций профилей у A-звезд составляют ~ 30 –120 мин.

Периоды вариаций профилей в спектрах B звезд являются промежуточными по сравнению с найденными для O- и A-звезд. Обнаружение в настоящем исследовании регулярной компоненты вариаций профилей линий в спектре ρ Leo с периодом ~ 18 –19 мин подтверждает этот вывод. В то же время выполненных до настоящего времени исследований пока недостаточно для анализа характера переменности профилей в зависимости от класса светимости звезды.

Следует отметить, что все звезды (за исключением γ UMi), у которых зарегистрирована быстрая спектральная переменность, являются магнитными со среднеквадратичным магнитным полем от ~ 1 кГс у α^2 CVn до ~ 50 Гс у ρ Leo. В то же время нельзя исключить, что столь большая доля магнитных звезд с быстрыми вариациями профилей линий в их спектрах связана с малостью выборки.

Все полученные до настоящего времени исследования быстрой спектральной переменности выполнены с использованием спектрографов низкого

разрешения $R = 1000$ –2000. При планировании будущих наблюдений важен вопрос, возможно ли увеличить спектральное разрешение, снизив временное разрешение, что может быть важно для анализа того, как меняются мелкие детали профилей линий.

При увеличении $R \rightarrow kR$, где $k > 1$ количество фотонов, попадающих на разрешающий элемент детектора (ПЗС-матрицы) за единицу времени, уменьшается в k раз. Для получения такого же числа фотонов на разрешающий элемент, как при прежнем значении R , требуется увеличение экспозиции в k раз. В то же время использование слишком низкого спектрального разрешения не позволяет анализировать изменение деталей профилей с ширинами $\delta V < 50$ –100 км/с. Планируемое авторами работы изучение спектральной переменности одного и того же объекта с использованием спектрографов с разными значениями R при фиксированном значении T/R позволит выбрать оптимальную стратегию наблюдений.

Исходя из анализа вариаций профилей линий сверхгиганта ρ Leo, полученных на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ в октябре–ноябре 2019 г., выполненного в настоящей работе, можно сделать следующие выводы:

- Обнаружены изменения профилей бальмеровских линий и линий HeI в спектре ρ Leo на минутных шкалах времени на уровне 1–2% от потока в соседнем с линией континууме.
- В вариациях профилей линий H β , H γ , HeI 4471 и HeI 4922 в спектре ρ Leo, возможно, присутствует регулярная компонента с периодом ~ 18 –19 мин. Эта компонента предположительно является первой гармоникой компоненты с частотой $\nu = 0.031$ мин⁻¹, обнаруженной при анализе вариаций профилей линий в спектре ρ Leo в работе Холтыгина и др. (2018).
- Проведенные спектральные наблюдения ρ Leo и их анализ показывают возможность изучения быстрых вариаций профилей широких линий в спектрах OBA звезд при использовании спектрографов низкого разрешения с $R = 1000$ –2000 и 1–2 метровых телескопов.

Настоящее исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (грант 19-02-00311 А). Авторы благодарны рецензенту за замечания, способствующие улучшению текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьева Н.М., Успехи физ. наук **166**, 1145 (1996).
2. Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 214 (2005) [V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005)].
3. Аэртс и др. (С. Aerts, D.M. Bowman, S. Simon-Diaz, В. Buyschaert, С. Johnston, E. Moravveji, P.G. Beck, P. De Cat, et al.), *MNRAS* **508**, 1234 (2018).
4. Витязев В.В., *Анализ неравномерных временных рядов* (СПб.: Изд. СПбГУ, 2001).
5. Гies, Ламберт (D.R. Gies and D.L. Lambert), *Astrophys. J.* **387**, 673 (1992).
6. Душин и др. (V.V. Dushin, A.F. Kholtygin, G.A. Chuntunov, and D.O. Kudryavtsev), *Astrophys. Bull.* **68**, 184 (2013).
7. Капер и др. (L. Kaper, H.F. Henrichs, A.W. Fullerton, H. Ando, K.S. Bjorkman, D.R. Gies, R. Hirata, E. Kambe, et al.), *Astron. Astrophys.* **327**, 281 (1997).
8. Короновский А.А., Храмов А.Е., *Непрерывный вейвлетный анализ* (М.: Физматлит, 2003).
9. Костенков и др. (A. Kostenkov, A. Batrakov, A. Kholtygin, and A. Valeev), *Astron. J. Azerbaijan* **15**, in press (2020).
10. Кроузе и др. (P.A. Crowther, D.J. Lennon, and N.R. Walborn), *Astron. Astrophys.* **446**, 279 (2006).
11. Кудряшова Н.А., Холтыгин А.Ф., Астрон. журн. **78** 333, (2001) [N.A. Kudryashova and A.F. Kholtygin, *Astron. Rep.* **45**, 287 (2001)].
12. Монин и др. (D.N. Monin, S.N. Fabrika, and G.G. Valyavin), *Astron. Astrophys.* **396**, 131 (2002).
13. Морел и др. (T. Morel, S.V. Marchenko, A.K. Pati, K. Kurpuswamy, M.T. Carini, E. Wood, R. Zimmermann, et al.), *MNRAS* **351**, 552 (2004).
14. Памятных (А.А. Pamyatnykh) *Acta Astron.* **49**, 189 (1999).
15. Робертс и др. (D.H. Roberts, J. Lehar, and J.W. Dreher), *Astron. J.* **93**, 968 (1987).
16. Симон-Диаз, Херреро (S. Simón-Díaz and A. Herrero), *Astron. Astrophys.* **562**, A135 (2014).
17. Хильер, Миллер (D.J. Hillier and D.L. Miller), *Astrophys. J.* **496**, 407 (1998).
18. Ховарт и др. (I.D. Howarth, K.W. Siebert, G.A.J. Hussain, and R.K. Prinja), *MNRAS* **284**, 265 (1997).
19. Холтыгин и др. (A.F. Kholtygin, J.C. Brown, J.P. Cassinelli, S. Fabrika, D.N. Monin, and A.E. Surkov), *Astron. Astrophys. Trans.* **22**, 499 (2003).
20. Холтыгин А.Ф., Бурлакова Т.Е., Фабрика С.Н. и др., Астрон. журн. **83**, 990 (2006) [A.F. Kholtygin, T.E. Burlakova, S.N. Fabrika, G.G. Valyavin, and M.V. Yushkin, *Astron. Rep.* **50**, 887 (2006)].
21. Холтыгин и др. (A.F. Kholtygin, S.N. Fabrika, T.E. Burlakova, G.G. Valyavin, G.A. Chuntunov, D.O. Kudryavtsev, D. Kang, M.V. Yushkin, and G.A. Galazutdinov), *Astron. Rep.* **51**, 920 (2007a).
22. Холтыгин и др. (A.F. Kholtygin, G.A. Chuntunov, S.N. Fabrika, T.E. Burlakova, G.G. Valyavin, Kang Dong-il, G.A. Galazutdinov, and M.V. Yushkin), *Physics of Magnetic Stars*, Proc. Conf., held in the Special Astrophys. Observ. of the Russian AS, August 28–31, 2006 (Ed. I.I. Romanyuk and D.O. Kudryavtsev, p. 262, 2007b).
23. Холтыгин А.Ф., Шнейвайс А.Б., Бурлакова Т.Е., Миланова Ю.В., *Астрофизика* **50**, 281 (2007) [A.F. Kholtygin, A.B. Shneiwaiss, T.E. Burlakova, and Yu.V. Milanova, *Astrophysics* **50**, 225 (2007c)].
24. Холтыгин А.Ф., Фабрика С.Н., Драке Н.А., Бычков В.Д., Бычкова Л.В., Чунтонов Г.А., Бурлакова Т.Е., Валявин Г.Г., Письма в Астрон. журн. **36**, 389 (2010) [A.F. Kholtygin, S.N. Fabrika, N.A. Drake, et al., *Astron. Lett.* **36**, 370 (2010)].
25. Холтыгин и др. (A.F. Kholtygin, S. Hubrig, V.V. Dushin, S. Fabrika, A. Valeev, M. Schöller, and A.E. Kostenkov), *Stars: From Collapse to Collaps*, Proc. Conf. held at Special Astroph. Observ., Nizhny Arkhyz, Russia 3–7 Oct. 2016 (Ed. Yu.Yu. Balega, D.O. Kudryavtsev, I.I. Romanyuk, I.A. Yakunin. San Francisco: Astron. Soc. Pacific, 299, 2017).
26. Холтыгин А.Ф., Батраков А.А., Фабрика С.Н. и др., Астроф. Бюлл. **73**, 498 (2018) [A.F. Kholtygin, A.A. Batrakov, S.N. Fabrika, A.F. Valeev, I.M. Tumanova, and O.A. Tsiopa, *Astrophys. Bull.* **73**, 471 (2018)].
27. Холтыгин А.Ф., Батраков А.А., Фабрика С.Н., Валеев А.Ф., Костенков А.Е., Циопа О.А., Астроф. Бюлл., в печати (2020).
28. Хубриг и др. (S. Hubrig, M. Schöller, and A.F. Kholtygin), *MNRAS* **440**, 1779 (2014).
29. Хубриг и др. (S. Hubrig, I. Ilyin, A.F. Kholtygin, M. Schöller, and M. Skarka), *Astron. Nachr.* **338**, 936 (2017).
30. Циопа и др. (A. Tsiopa, A. Batrakov, A. Kholtygin, S. Hubrig, S. Fabrika, A. Kostenkov, and A. Valeev), *Astron. J. Azerbaijan* **15**, in press (2020).