

ПОИСК СВЕРХБЫСТРОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ ϵ Per A

А.Ф.ХОЛТЫГИН^{1,2}, В.Б.ПУЗИН², И.В.СОКОЛОВ², Г.М.КАРАТАЕВА¹

Поступила 5 декабря 2019

Принята к печати 24 июня 2020

Представлены результаты наблюдений высокого временного разрешения ($\Delta T \sim 4$ мин) В0.5V звезды ϵ Per A на 2-м телескопе обсерватории на пике Терскол. Зарегистрированы регулярные компоненты вариаций профилей линий с периодами 1.5-18 часов. Обнаружены свидетельства нерегулярных вариаций профилей линий на минутных шкалах времени. Обсуждается природа таких вариаций.

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле - звезды: химически пекулярные - звезды: индивидуальные - ϵ Per A*

1. *Введение.* Профили линий в спектрах ОВА звезд переменны на временных шкалах от дней до часов [1-3]. До последнего времени вариации профилей на минутных шкалах времени не были известны и впервые обнаружены в 2014г. Хубриг и др. [4] обнаружили изменения профилей линий Si II и Fe II в спектрах A0 сверхгиганта HD 92207 на промежутках времени 1-2 мин.

Эта работа стала триггером наших исследований сверхбыстрой переменности (на минутных 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 [6]. В работе [5] представлены результаты анализа сверхбыстрой переменности в спектре звезды HD93521 (O9.5III) по наблюдениям на БТА в 2015г. Были обнаружены регулярные вариации с периодами 4-5 и 32-36 мин.

В работе [9] представлены результаты поиска быстрых вариаций в спектрах медленно вращающегося [7] сверхгиганта ρ Leo (B1a). Обнаружены короткопериодические регулярные вариации 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 при предположении, что высокие моды нерадиальных пульсаций нестабильны и могут как затухать, так и генерироваться на коротких шкалах времени порядка 10 - 100 мин.

В настоящей работе исследуется переменность профилей линий в спектре B0.5V звезды ϵ Per (45 Per, HR 1220, HD 24760, ADS 2888A) из анализа профилей линий, полученных на 2-м телескопе обсерватории на пике Терскол. Tarasov et al. [8] показали, что ϵ Per является тройной системой, состоящей из спектроскопически двойной звезды (B0.5+A2) с периодом обращения 14.076 дней и массами компонентов $13.5 \pm 2 M_{\odot}$ и $1 - 2 M_{\odot}$ и далекого третьего компонента (A или B звезды с массой $2 - 5 M_{\odot}$) с периодом обращения ~ 11 лет.

Данная звезда является одним из наиболее ярких объектов в списке программных звезд [2] для изучения быстрой переменности линий, что позволяет достичь отношения сигнал/шум > 500 при экспозициях 1-2 мин.

В спектральных наблюдениях ϵ Per A, представленных в [12], обнаружена переменность профилей линий Si III $\lambda 4818 \text{ \AA}$. Авторы статьи [13] из анализа оптических и УФ спектров звезды, полученных на спутнике IUE, определили периоды вариаций профилей линий в спектре ϵ Per A в интервале периодов 2.27-8.46 часа.

В работе [15] сообщается об измерениях магнитного поля ϵ Per A. Полученное значение $B_l = 130 \pm 140$ Гс не позволяет сделать вывод о величине магнитного поля звезды. В статье [3] получено значение магнитного поля ϵ Per A $\bar{B}_l = 210 \pm 100$ Гс. То есть до настоящего времени вопрос о величине магнитного поля ϵ Per A остается открытым.

В разделе 2 данной статьи представлены основные сведения об изучаемом объекте. Выполненные наблюдения и процедура их обработки описаны в разделе 3. Вариации профилей линий в спектре ϵ Per A обсуждаются в 4-м разделе. Результаты Фурье-анализа вариаций профилей линий представлены в разделе 5, а вейвлет-анализа - в разделе 6.

2. Основные сведения об объекте. Звезда ϵ Per (HD 24760) является кратной системой, состоящей из трех компонентов [16]. Главный компонент этой системы - быстровращающаяся звезда ϵ Per A спектрального класса B0.5III-V [17] типа β Сер. В настоящей статье анализируются спектры, принадлежащие компоненту A.

Параметры главного компонента системы ϵ Per A даны в табл.1, где P_{rot} - период вращения, P_{orb} - период обращения двойной системы B0.5+A2. Звезда ϵ Per A является ярким рентгеновским источником [18] и характеризуется большой скоростью потери массы [19]. Основной причиной спектральной переменности ϵ Per A и ее высокой рентгеновской светимости может быть наличие у звезды умеренного магнитного поля [20]. Возраст звезды τ был

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ГЛАВНОГО B0.5 КОМПОНЕНТА ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ ε Per A

Параметр	Значения	Ссылка
Спектр. класс	B0.5 V	[17]
$M / M_{\odot}$	13.5 ± 0.2	[8]
$R / R_{\odot}$	6.9 ± 0.2	[8]
T_{eff} , K	26405 ± 1549	[16]
$\log g$	3.85 ± 0.13	[16]
$V \sin i$, км/с	130	[24]
P , d	2.24	[25,14]
P_{puls} , d	0.1603	[24]
P_{orb} , d	14.076	[8]
$-\log \dot{M}$, $M_{\odot} \text{ год}^{-1}$	6.90	[19]
$\log L / L_{\odot}$	4.86	[19]
Возраст τ , 10^6 год	10	[3]

определен в работе [3] с использованием эволюционных треков и изохрон вращающихся массивных звезд ГП [21].

3. *Наблюдения.* Наблюдения ε Per A были выполнены на 2-м телескопе обсерватории на пике Терскол ТФ ИНАСАН в ночи 18/19 и 20/21 января 2019г. с использованием эшелюного спектрометра MMCS в фокусе Кассегрена. Все спектры были получены с экспозицией 150 с.

В табл.2 представлен журнал наблюдений ε Per A. Спектры были получены в области $\lambda\lambda$ 3598 – 7447 Å со спектральным разрешением ~ 15000 . Калибровка

Таблица 2

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ ε Per A

Но. спектра	MJD	Но. спектра	MJD	Но. спектра	MJD
44104	58501.82569	44117	58501.86319	44315	58503.74583
44105	58501.82916	44118	58501.86597	44316	58503.74861
44106	58501.83194	44119	58501.86944	44317	58503.75208
44107	58501.83472	44305	58503.71736	44318	58503.75486
44108	58501.83750	44306	58503.71944	44319	58503.75769
44109	58501.84028	44307	58503.72292	44320	58503.76042
44110	58501.84306	44308	58503.72639	44321	58503.76389
44111	58501.84583	44309	58503.72917	44322	58503.76667
44112	58501.84861	44310	58503.73194	44323	58503.77014
44113	58501.85208	44311	58503.73472	44324	58503.77292
44114	58501.85486	44312	58503.73750	44325	58503.77569
44115	58501.85764	44313	58503.74028		
44116	58501.86042	44314	58503.74306		

спектров была выполнена для спектра в целом, длины волн указывались в каждом порядке. Отношение сигнал/шум существенно падает к краям матрицы, поэтому для анализа переменности профилей следует выбирать линии ближе к середине порядка.

Спектры с номерами 44305 и 44306 характеризуются скачками наблюдаемых потоков, вероятно связанных со сбоями в матрице при записи спектра. В дальнейшем были использованы только те линии, которые не попадали в данные области неоднородной чувствительности.

4. *Вариации профилей линий.* Профили линий, пригодных для анализа их переменности, были нормированы на локальный континуум. Процедура нормировки описана в работе [22]. На рис.1 показаны нормированные профили линий HeI 4922 и Na. Профили линий, полученные 18 ноября 2019г., показаны сплошными линиями, а те, которые были получены 20 ноября - пунктиром. Средние профили линий представлены толстыми точечными линиями.

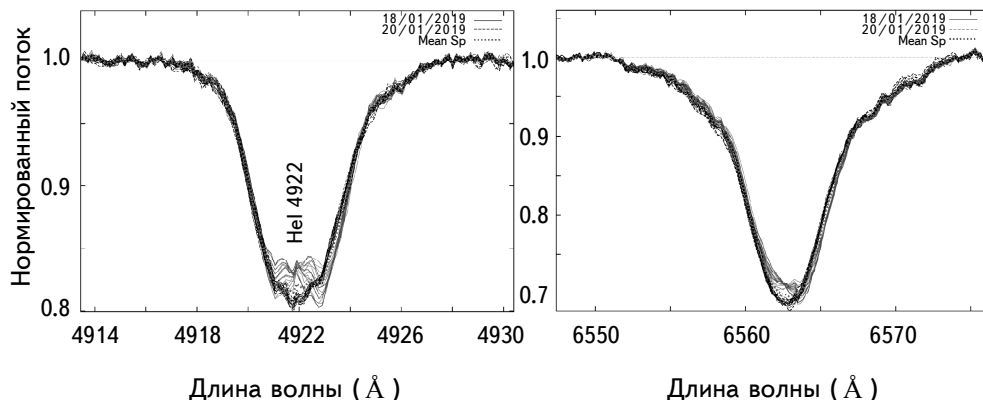


Рис.1. Нормированные профили линий HeI 4922 и Na.

Профили линий, полученные в разные даты, существенно отличаются друг от друга и хорошо видны на рис.1. Усредненные по всем спектрам, полученным в разные даты, профили линий HeI 4922 и Na изображены на рис.2. Видно, что данные средние профили отличаются на 1-3% в единицах потока в соседнем континууме. Различия профилей максимальны в области центров указанных линий.

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

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

Здесь $F_i(V, t)$ - профиль линии в момент времени t , а $\overline{F(V)}$ - средний

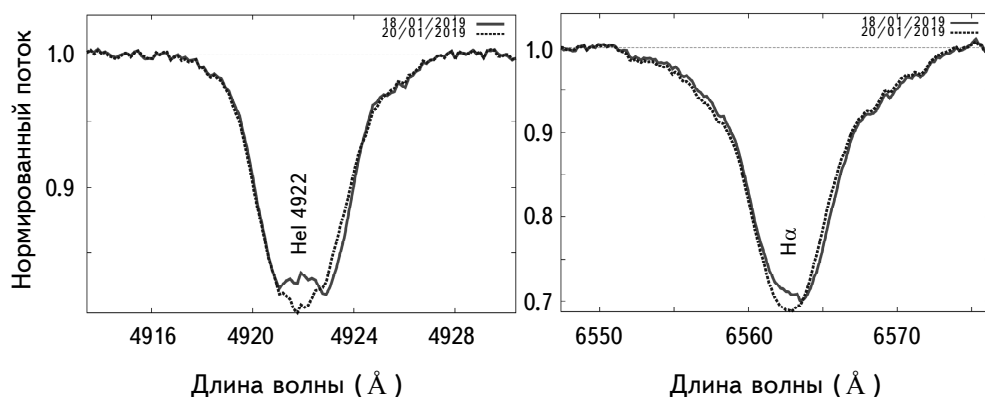


Рис.2. Средние профили линий HeI 4922 (слева) и H α (справа) в ночи 18.01.2019 (сплошная линия) и 20.01.2019 (пунктирная линия).

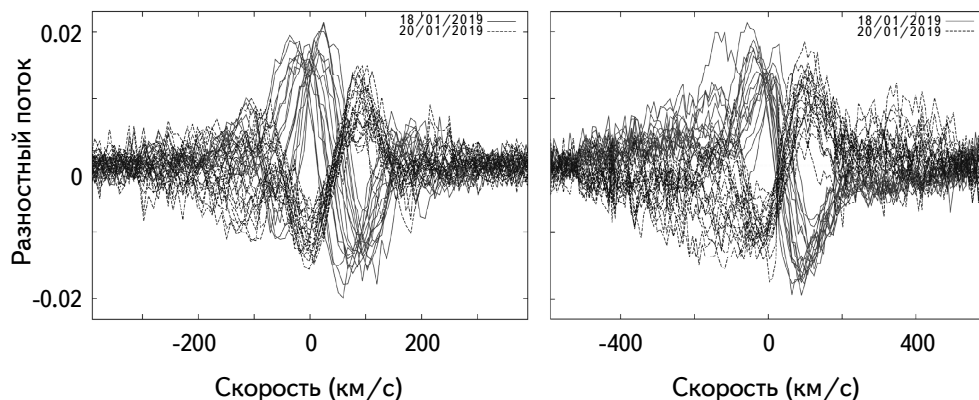


Рис.3. Разностные профили линий HeI 4922 и H α .

профиль линии, где $V = (\lambda - \lambda_0)/c$ - доплеровское смещение от центральной длины волны линии λ_0 , c - скорость света.

На рисунке видно, что разностные спектры, полученные в ночи наблюдений 18.02.2019 и 20.02.2019, сильно различаются. По этой причине быстрые вариации профилей линий целесообразно изучать для каждой ночи отдельно. На рис.4 показаны динамические спектры вариации профилей линий HeI 4922 отдельно для каждой ночи наблюдений, при этом при вычислении разностных профилей по формуле (1) средние профили вычислялись отдельно для каждой из наблюдательных ночей.

Динамические спектры вариации профилей линий H α даны на рис.5. Сравнив рис.4 и 5, можно сделать вывод, что характер вариаций профилей линий одинаков для разных линий.

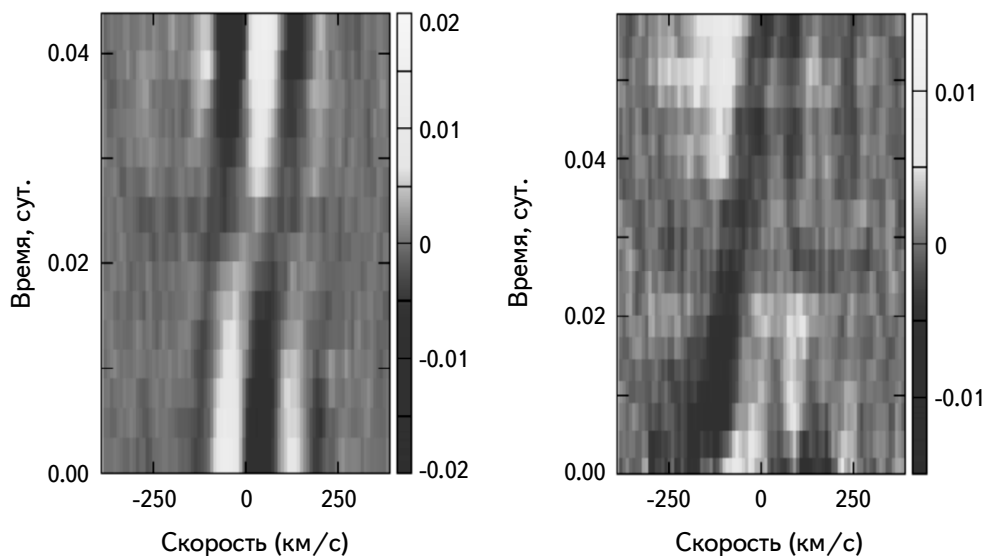


Рис.4. Динамические спектры вариации профилей линий HeI 4922 18 ноября 2019г. (слева) и 20 ноября 2019г. (справа).

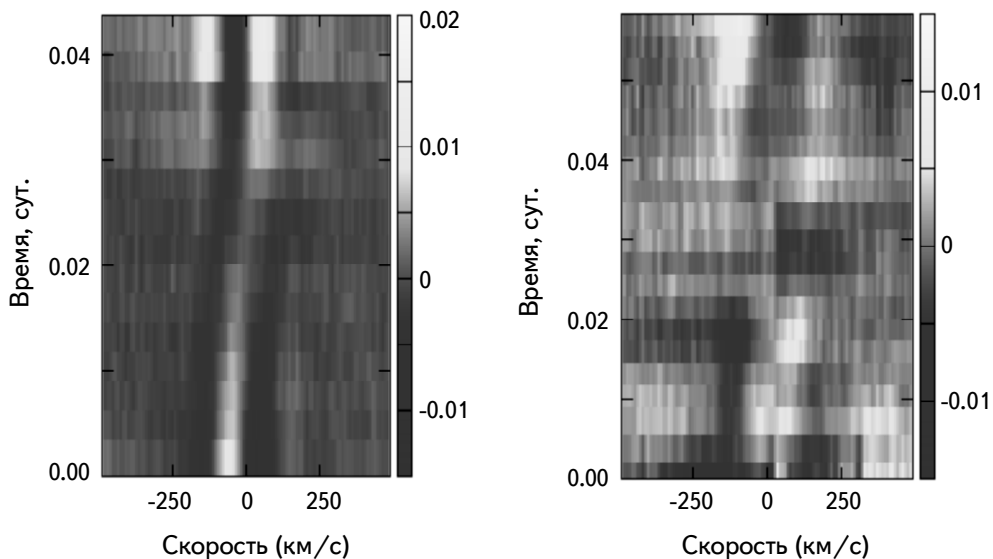


Рис.5. То же, что на рис.3, но для линии H α .

4.1. *Нерегулярные вариации профилей в центре линий.* В спектре звезды ρ Leo найдены нерегулярные вариации профилей линий на секундных шкалах [9]. Такого типа вариации профилей линий в спектре ε Per A не были найдены. В то же время, как видно на рис.1, в центре профилей линий

HeI 4922 и H α в спектре ϵ Per A присутствуют быстрые вариации профилей, имеющие, возможно, нерегулярный характер.

Такие вариации профилей похожи на обнаруженные в спектре Ве звезды λ Eri нерегулярные изменения (рис.1, 2 в статье [23]) профиля линии HeI6678. Такие вариации, названные авторами статьи [23] впадинами (dimples), интерпретируются как результат отражения фотосферного излучения от неоднородностей в ветре звезды.

Хотя природа быстрых вариаций профилей в спектре ϵ Per A может отличаться от природы нерегулярных изменений профилей в спектре λ Eri, само наличие подобных вариаций профилей в спектре ϵ Per A может быть свидетельством неоднородности звездного ветра.

5. Фурье-анализ профилей линий. Для поиска периодических компонентов в вариациях профилей линий был выполнен их Фурье-анализ. Для этой цели был использован метод CLEAN [26] с учетом результатов анализа временных рядов с большими пропусками [27]. На рис.6 представлен Фурье-спектр вариаций профилей линий в спектре ϵ Per A для уровня значимости $\alpha = 10^{-4}$.

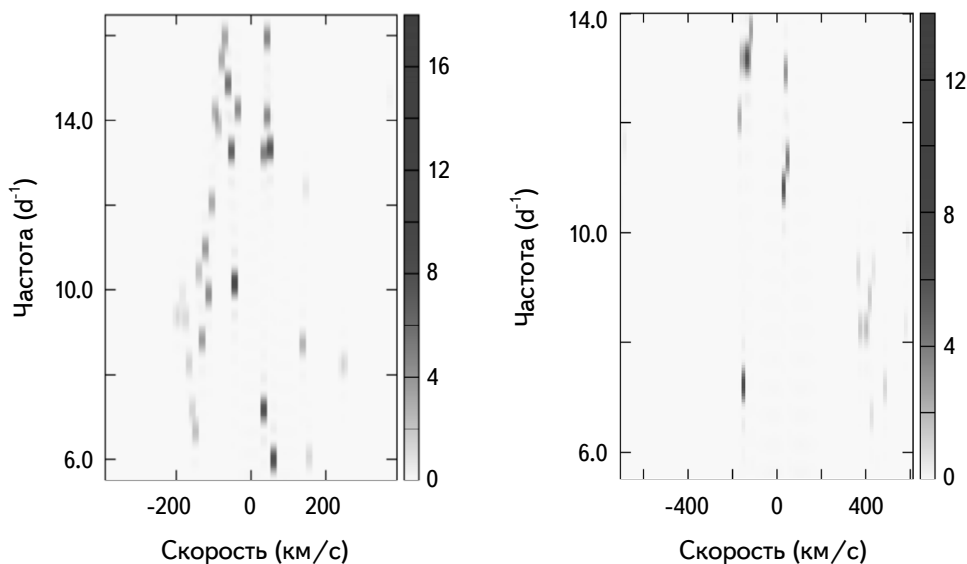


Рис.6. Фурье-спектр вариаций профилей линий HeI 4922 (слева) и H α (справа).

В Фурье-спектре присутствуют регулярные компоненты с частотами 1.3–15 d $^{-1}$ и периодами 1.5–18 часов. В табл.3 найденные частоты регулярных компонентов в Фурье-спектре вариаций профилей линий HeI 4922, H α и H β сравниваются с полученными в работах [3,13,14]. Компонент с номером 6 соответствует периоду пульсаций, приведенному в табл.1.

Таблица 3

ЧАСТОТЫ В d^{-1} И ПЕРИОДЫ В ЧАСАХ (в скобках)
 ФУРЬЕ-КОМПОНЕНТОВ ВАРИАЦИЙ ПРОФИЛЕЙ
 ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ ε Per A

Наст. работа				Ссылки		
Но. комп.	HeI 4922	H α	H β	[3]	[13]	[14]
1	-	1.33 (18.05)	1.33 (18.05)	-	-	-
2	-	2.36 (10.17)	-	-	2.84 (8.45)	-
3	4.51 (5.32)	4.01 (5.98)	-	4.59 (5.23)	-	-
4	-	-	-	5.35 (4.49)	5.28 (4.55)	5.30 (4.53)
5	-	-	-	-	5.91 (4.06)	5.89 (4.07)
6	6.24 (3.85)	-	-	6.11 (3.93)	6.25 (3.84)	6.25 (3.84)
7	7.18 (3.34)	7.21 (3.33)	-	6.88 (3.49)	6.84 (3.51)	6.88 (3.49)
8	8.50 (2.82)	8.26 (2.91)	-	8.41 (2.85)	-	-
9	9.90 (2.42)	-	-	9.94 (2.41)	-	-
10	10.51 (2.28)	10.08 (2.38)	10.77 (2.23)	-	10.58 (2.27)	10.58 (2.27)
11	13.14 (1.82)	13.05 (1.84)	12.87 (1.86)	12.99 (1.85)	-	-
12	15.55 (1.54)	-	-	-	-	-

Полный период наблюдений составляет менее двух суток, что составляет менее 14% орбитального периода, поэтому орбитальное движение главного компонента не влияет на найденные частоты вариаций профилей линий.

Ошибки в частотах компонентов в табл.3 составляют $1/T_{obs} \approx \pm 0.5$, где T_{obs} - время наблюдений, что говорит о том, что в пределах точности измерений найденные частоты соответствуют определенным в указанных работах. Отметим, что регулярный компонент вариации профилей с частотой $\nu = 15.55 d^{-1}$ ($P = 1.5$ ч) обнаружен впервые.

В работе [28] рассчитаны возможные частоты нерадиальных пульсаций для модели звезды ε Per A. Периоды вариаций профилей 2-6 ч соответствуют модам нерадиальных пульсаций $l = 4 - 6$ (рис.4 в цитированной статье). Большие периоды соответствуют значениям $l = 1 - 3$ (рис.3). Период пульсаций $P_{12} = 1.5$ ч соответствует большим значениям $l > 6$.

6. *Вейвлет-анализ профилей линий.* Анализ разностных профилей линий в спектрах ε PerA (рис.3) показывает присутствие в них дискретных компонентов. Мелкомасштабные детали связаны с шумовым компонентом профилей, а детали больших масштабов могут относиться как к регулярному, так и нерегулярному компонентам вариаций профилей. Наиболее подходящим математическим аппаратом для исследования развития 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 [10,11]:

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

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

Плотность энергии сигнала $E(s, V, t) = W^2(s, V, t)$ характеризует распределение энергии исследуемого сигнала в пространстве (s, V) = (масштаб, 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 и линий HeI для всех моментов времени t , в которые получены спектры звезды в наблюдательные ночи 18.01.2019 и 20.01.2019. Совокупность функций

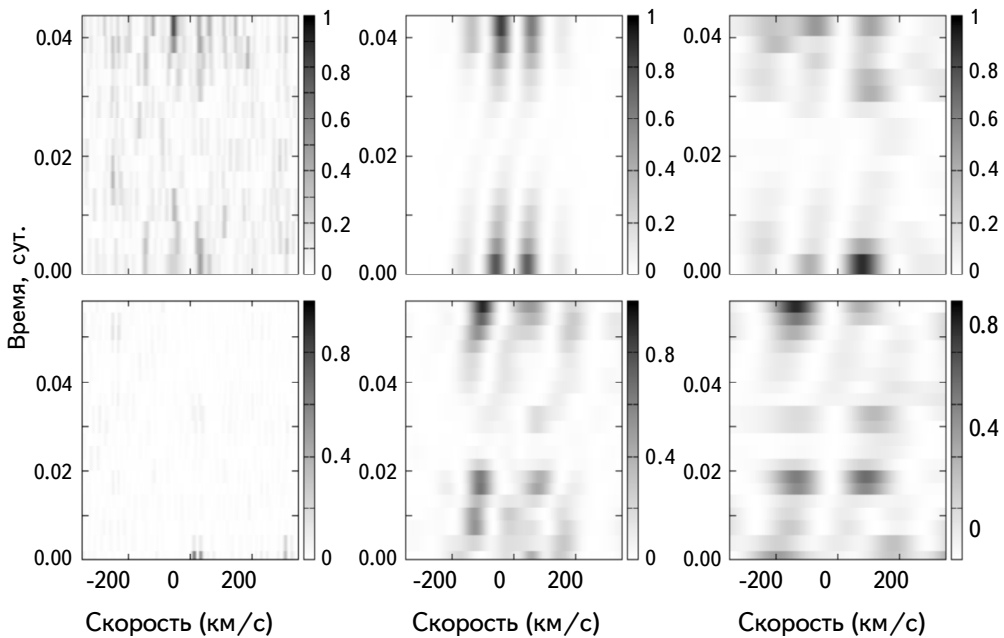


Рис.7. Динамический вейвлет-спектр вариации профилей линии $H\alpha$ с МНАТ материнским вейвлетом на масштабах $S = 10, 50$ и 120 км/с (слева-направо) для спектров, полученных 18.01.2019 (вверху) и 20.01.2019 (внизу).

$E(s, V, t)$ 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 [22], в которой анализировались непосредственно значения амплитуд вейвлет-преобразования $W(s, V, t)$. На рис.7 представлены динамические вейвлет-спектры линии $\text{H}\alpha$ в спектрах ϵ Per A, полученных 18.01.2019 и 20.01.2019. Из анализа рисунка видно, что характер вариаций одинаков для спектров, полученных в разные ночи.

На малых масштабах $s \leq 10$ км/с в вейвлет вариациях профилей виден главным образом вклад шумовой компоненты профиля. В то же время на больших масштабах $s > 120$ км/с детали вариаций профилей замыкаются вследствие слишком большой ширины масштабированного материнского вейвлета. Наиболее отчетливо характер временной вариации профилей в динамических вейвлет-спектрах виден на масштабах $s = 40 - 60$ км/с. Можно сделать вывод, что этот масштаб связан с дисперсией скоростей в неоднородностях ветра ϵ Per A.

Согласно оценкам в статье [29] дисперсия скоростей ~ 50 км/с соответствует размеру неоднородностей $\sim 0.5 R_{\odot}$, что составляет меньше $0.1 R_*$, где R_* - радиус ϵ Per A. Формирование неоднородностей такого размера в ветре ϵ Per A вполне возможно.

7. Заключение. В настоящей работе был выполнен анализ вариаций профилей линий ϵ Per A, полученных на 2-м телескопе обсерватории на пике Терскол в январе 2019г. В результате анализа можно сделать следующие выводы:

- В профилях бальмеровских линий и линий HeI в спектре ϵ Per A обнаружены регулярные вариации профилей линий с амплитудой в 2-3% от потока в соседнем с линией континууме с периодами от 1.5 до 18ч, связанные, возможно, с низкими модами нерадиальных пульсаций звезды $l = 1 - 6$. Самый короткий период пульсаций $P_{12} = 1.5$ ч вероятно соответствует более высоким модам $l > 6$.

- Анализ динамических вейвлет-спектров вариаций профилей линий в спектре ϵ Per A свидетельствует о возможном присутствии в ветре ϵ Per A неоднородностей на масштабах 40 - 60 км/с.

Настоящее исследование поддержано грантом Российского научного фонда № 18-12-00423.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, СПб,
Россия, e-mail: afkholtygin@gmail.com

² Институт Астрономии РАН

SEARCHING SUPERFAST LINE PROFILE VARIABILITY
IN THE SPECTRUM OF ε Per AA.F.KHOLTYGIN^{1,2}, V.B.PUZIN², I.V.SOKOLOV², G.M.KARATAEVA¹

The results of observations of high temporal resolution ($\Delta T \sim 4$ min) of the B0.5 supergiant ε Per A at the 2-m telescope of the Terskol Observatory are presented. Regular components of variations in line profiles with periods from 1.5 to 18 hours are registered. Evidences of irregular line profile variations on minute time scales are detected. The nature of such variations is discussed.

Keywords: *stars: magnetic field-stars: chemically peculiar-stars: individual: ε Per A*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.Kaper, H.F.Henrichs, A.W.Fullerton et al.*, *Astron. Astrophys.*, **327**, 281, 1997.
2. *A.F.Kholtygin, J.C.Brown, J.P.Cassinelli et al.*, *A&ATr*, **22**, 499, 2003.
3. *В.В.Душин, А.Ф.Холтыгин, Г.А.Чунтонов и др.*, *Астрофиз. Бюлл.*, **68**, 195, 2013, (*Astrophys. Bull.*, **68**, 184, 2013).
4. *S.Hubrig, M.Schoeller, A.F.Kholtygin*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **440**, 1779, 2014.
5. *A.F.Kholtygin, S.Hubrig, V.V.Dushin et al.*, in "Stars: From Collapse to Collapse", *Proc. Conf. held at Russia 3-7 Oct. 2016*. Eds. Yu.Yu.Balega, D.O.Kudryavtsev, I.I.Romanyuk, I.A.Yakunin. San Francisco: *Astron. Soc. Pacific*, 299, 2017.
6. *В.Л.Афанасьев, А.В.Мусеев*, *Письма в Астрон. ж.*, **31**, 214, 2005, (*Astron. Lett.*, **31**, 194, 2005).
7. *C.Aerts, D.M.Bowman, S.Simon-Diaz et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **508**, 1234, 2018.
8. *A.E.Tarasov, P.Harmanec, J.Horn et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **110**, 59, 1995.
9. *А.Ф.Холтыгин, А.А.Батраков, С.Н.Фабрика и др.*, *Астрофиз. Бюлл.*, **73**, 498, 2018, (*Astrophys. Bull.*, **73**, 471, 2018).
10. *Н.М.Астафьева*, *Усп. физ. наук.*, **166**, 1145, 1996, (*Physics-Uspekhi*, **39**, 1085, 1996).
11. *A.A.Koronovskii, A.E.Khramov*, *Continuous wavelet analysis and its applications*, М., *Fizmatlit*, 2003.
12. *M.A.Smith*, *Astrophys. J.*, **288**, 266, 1985.
13. *D.R.Gies, E.Kamne, T.S.Joseph et al.*, *Astrophys. J.*, **525**, 420, 1999.
14. *P. De Cat, J.Telting, C.Aerts et al.*, *Astron. Astrophys.*, **359**, 539, 2000.

15. *N.E.Piskunov, J.A.Valenti*, *Astron. Astrophys.*, **385**, 1095, 2002.
16. *Y.Wu, H.P.Singh, P.Prugniel et al.*, *Astron. Astrophys.*, **525**, 71, 2011.
17. *J.Libich, P.Harmanec, J.Vondrák et al.*, *Astron. Astrophys.*, **446**, 583, 2011.
18. *T.W.Berghoefer, J.H.M.M.Schmitt, J.P.Cassinelli*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **118**, 481, 2011.
19. *I.R.G.Wilson, M.A.Dopita*, *Astron. Astrophys.*, **149**, 295, 1985.
20. *A.M.T.Pollock*, *Astron. Astrophys.*, **463**, 1111, 2007.
21. *I.Brott, S.E. de Mink, M.Cantiello et al.*, *Astron. Astrophys.*, **530**, A115, 2011.
22. *А.Ф.Холтыгин, Т.Е.Бурлакова, С.Н.Фабрика и др.*, *Астрон. ж.*, **83**, 990, 2006, (*Astron. Rep.*, **50**, 887, 2006).
23. *M.A.Smith, R.S.Polidan*, *Astrophys. J.*, **408**, 323, 1993.
24. *A.Stankov, G.Handler*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **158**, 193, 1995.
25. *P.Harmanec*, *Astron. Astrophys.*, **341**, 867, 1999.
26. *D.H.Roberts, J.Lehar, J.W.Dreher*, *Astron. J.*, **93**, 968, 1987.
27. *А.Ф.Холтыгин, А.Б.Шнейвайс, Т.Е.Бурлакова и др.*, *Астрофизика*, **50**, 281, 2007, (*Astrophysics*, **50**, 225, 2007).
28. *H.Saio, E.Kambe, U.Lee*, *Astrophys. J.*, **543**, 359, 2000.
29. *Н.А.Кудряшова, А.Ф.Холтыгин*, *Астрон. ж.*, **78**, 333, 2001, (*Astron. Rep.*, **45**, 287, 2001).