

УДК 524.3–337, 524.35, 524.335.8

## СВЕРХБЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ ОВА-ЗВЕЗД. II. A0-ЗВЕЗДА $\alpha^2$ CVn

© 2020 А. Ф. Холтыгин<sup>1\*</sup>, А. А. Батраков<sup>1</sup>, С. Н. Фабрика<sup>2</sup>,  
А. Ф. Валеев<sup>2</sup>, А. Е. Костенков<sup>1,2</sup>, О. А. Циопа<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>3</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 7 декабря 2019 года; после доработки 20 марта 2020 года; принята к публикации 20 марта 2020 года

Настоящая работа является продолжением исследований сверхбыстрой переменности профилей линий в спектрах звезд ранних спектральных классов, выполнявшихся в 2017 и 2018 гг. Мы изучали переменность профилей линий в спектре ОВА-звезд с многорежимным фокальным редуктором SCORPIO на 6-м телескопе БТА. Обнаружены короткопериодические регулярные вариации линий H и He в спектрах химически пекулярной A0Vp-звезды  $\alpha^2$  CVn с периодами примерно от 30 до 135 минут. Использование оконного Фурье-преобразования позволило обнаружить квазирегулярные транзитные вариации профилей бальмеровских линий с периодами 3–6 минут. Обсуждается возможное происхождение обнаруженных быстрых спектральных вариаций.

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле — звезды: химически пекулярные — звезды: индивидуальные:  $\alpha^2$  CVn*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Профили линий в спектрах ОВА-звезд переменны на временных шкалах от дней до часов (Dushin et al. 2013, Капер et al. 1997, Kholtygin et al. 2003). Вариации профилей на минутных шкалах до последнего времени не были исследованы. Hubrig et al. (2014) обнаружили изменения профилей линий Si II и Fe II в спектрах A0-сверхгиганта HD 92207 на промежутках 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 их спектрах, полученных с высоким (минута и меньше) временным разрешением при использовании редуктора светосилы SCORPIO 6-метрового телескопа БТА (Afanasiev and Moiseev 2005). В работе Kholtygin et al. (2017) представлены результаты анализа сверхбыстрой переменности в спектре звезды HD 93521 (O9.5III) по наблюдениям на БТА в 2015 г. Были обнаружены регулярные вариации с периодами 4–5 и 32–36 мин.

Kholtygin et al. (2018) представили результаты поиска быстрых вариаций в спектрах медленно вращающегося (Aerts et al. 2018) сверхгиганта  $\rho$  Leo (B1a). Обнаружены короткопериодические регулярные вариации линий H и He с периодами от 2 до 90 мин. Установлено, что периоды вариаций профилей линий в области 2–10 мин являются переменными. Наличие таких компонент в регулярных вариациях профилей линий объяснено при предположении, что высокие моды нерадиальных пульсаций (НРП) нестабильны и могут как затухать, так и генерироваться на коротких шкалах времени порядка 10–100 мин.

Особый интерес вызывает присутствие в спектре  $\rho$  Leo профилей линий, существенно отклоняющихся от среднего. Появление подобных профилей в спектре говорит о возможном вкладе слабой эмиссионной компоненты в полный профиль линии и может свидетельствовать о нерегулярных вариациях профилей на секундной шкале времени. Такие вариации могут быть связаны с высвечиванием горячего газа в неоднородностях звездного ветра после прохождения по ним ударной волны.

В настоящей статье анализируются результаты наблюдений химически пекулярной A0Vp-звезды и магнитного стандарта  $\alpha^2$  CVn на БТА с фокальным редуктором SCORPIO со сверхвысоким

\*E-mail: afkholtygin@gmail.com

временным разрешением. Несмотря на большое число публикаций, посвященных изучению этой звезды<sup>1</sup>, ее переменность на коротких временных шкалах практически не исследована. Можно отметить только статью Kuvshinov and Plachinda (1983), в которой изучены вариации профилей линий в ядре линии  $H\gamma$  и  $K$ -линии  $Ca II$ . Сообщается об обнаружении нерегулярных вариаций профилей этих линий на шкалах времени от минут до часов. Данные наблюдения выполнены с помощью фотоэлектрических приемников на 2.6-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории и должны быть проверены с использованием более точных детекторов излучения.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод об особой важности исследования переменности профилей линий в спектре  $\alpha^2 CVn$  на коротких временных шкалах.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 даны основные сведения о звезде и описаны наблюдения и обработка спектров. Вариации профилей линий проанализированы в разделе 3. В разделе 4 обсуждаются результаты анализа переменности профилей. Выводы даны в разделе 6.

## 2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ, НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Химически пекулярная звезда  $\alpha^2 CVn$  (HD 112413) является магнитным стандартом. Параметры звезды представлены в таблице 1. Здесь  $T_{\text{eff}}$  — эффективная температура звезды,  $M$  — масса звезды,  $L$  — болометрическая светимость,  $B_d$  — напряженность магнитного поля на полюсах,  $v \sin i$  — скорость вращения звезды,  $P_{\text{rot}}$  — период вращения. В прямых скобках приведено содержание элементов в логарифмической шкале.

Необычной особенностью звезды  $\alpha^2 CVn$  является слабость ее рентгеновского излучения. Данные рентгеновских наблюдений на спутниках Chandra и XMM показывают, что ее рентгеновский поток  $\lg L_X < 29.6$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , это на 3–4 порядка меньше типичных значений для звезд типа  $\alpha^2 CVn$  (Robrade and Schmitt 2011).

Наблюдения  $\alpha^2 CVn$  на БТА проводились 20/21 января 2015 г. со светосильным спектрографом SCORPIO. Спектральное разрешение составляло 2000 (размер щели 0"5), диапазон длин волн 4055–5853 Å,  $S/N \approx 2000$ . Полное время наблюдений за один спектр с учетом считывания CCD составляет 6 с, экспозиция от 1 до 2 с. В ходе наших наблюдений в 2015 г. было получено 866

Таблица 1. Параметры  $\alpha^2 CVn$

Параметр	Значение	Ссылка
$T_{\text{eff}}$ , К	$11320 \pm 600$	Sikora et al. (2019a)
$\lg g$	$3.9 \pm 0.1$	Silvester et al. (2014)
$M/M_{\odot}$	$2.97^{0.22}_{-0.32}$	Sikora et al. (2019a)
$R/R_{\odot}$	$2.52 \pm 0.31$	Sikora et al. (2019a)
$\lg L/L_{\odot}$	$1.97 \pm 0.07$	Sikora et al. (2019a)
$B_d$ , Гс	$3460^{+2290}_{-690}$	Sikora et al. (2019b)
$v \sin i$ , км $\text{с}^{-1}$	$23 \pm 3$	Romanyuk et al. (2018)
$P_{\text{rot}}$ , дней	5.46913	Sikora et al. (2019b)
[Si/H]	$-2.93 \pm 0.24$	Sikora et al. (2019a)
[Fe/H]	$-2.90 \pm 0.14$	Sikora et al. (2019a)

спектров звезды. Обработка спектральных данных была выполнена с помощью пакета MIDAS.

В результате обработки выяснилось, что существенная часть спектров недостаточно высокого качества, и только 387 из них могут быть использованы для анализа переменности профилей линий. На рис. 1 показан нормированный на континуум участок спектра звезды  $\alpha^2 CVn$  в области  $\lambda\lambda 4074$ – $5795$ , усредненный по отобранному 387 наблюдениям на SCORPIO.

## 3. ВАРИАЦИИ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

На рис. 2 показаны профили линий  $H\gamma$  и  $H\beta$  в спектре  $\alpha^2 CVn$ . Изменения профилей линий могут быть связаны как с вариациями поля скоростей в атмосфере звезды, например, вследствие нерадиальных пульсаций, так и с неравномерным распределением элементов, таких как O, Si, Fe и некоторые другие, по поверхности звезды (Silvester et al. 2014).

### 3.1. Регулярные вариации профилей линий

Для поиска регулярных компонент вариаций профилей определим разностные профили линий. Пусть в результате проведенных наблюдений получено  $N$  спектров исследуемого объекта. Обозначим через  $F_i(\lambda)$ ,  $i = 1, \dots, N$  нормированный на континуум поток в  $i$ -м спектре звезды на длине волны  $\lambda$ . Пусть  $\bar{F}_i(\lambda)$  — средний по всем наблюдениям поток на длине волны  $\lambda$ . Тогда разностный профиль линии

$$d(\lambda) = F_i(\lambda) - \bar{F}_i(\lambda). \quad (1)$$

<sup>1</sup>634 ссылки по теме статьи в ADS.

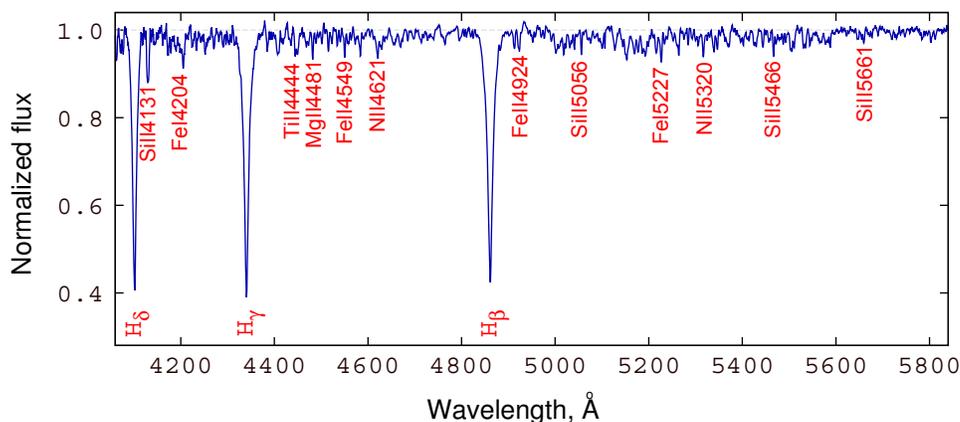


Рис. 1. Средний нормированный спектр  $\alpha^2$  CVn.

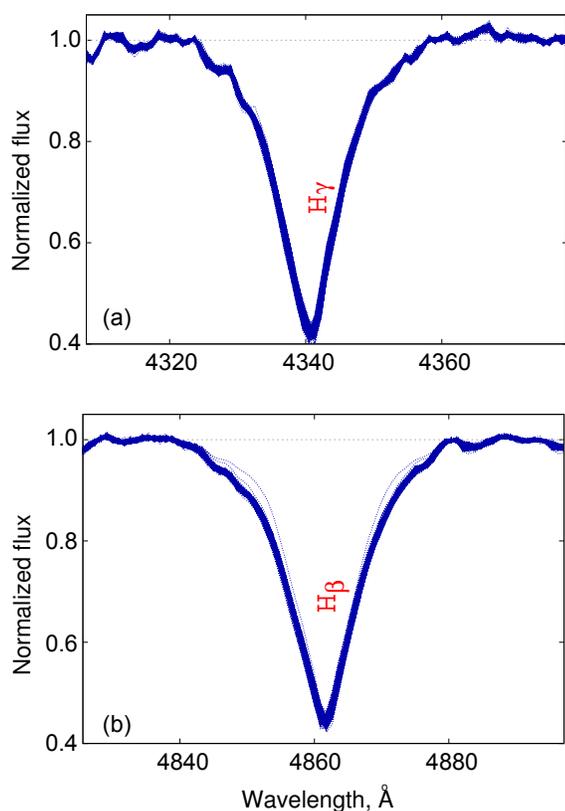


Рис. 2. Профили линий  $H\gamma$  и  $H\beta$  387 спектров  $\alpha^2$  CVn.

При анализе разностных профилей удобнее использовать вместо длины волны доплеровские смещения  $V$  от лабораторной длины волны  $\lambda_0$  линии  $V = c(\lambda/\lambda_0 - 1)$ , где  $c$  — скорость света.

При использовании спектров существенно разного качества следует при расчете среднего и разностных профилей линий использовать разные веса профилей  $g_i$ , пропорциональные квадрату отношения  $S/N$  в области континуума вблизи линии. Однако, так как во всех анализируемых нами про-

филях отношения  $S/N$  близки, можно положить  $g_i = 1$ .

На рис. 3 представлен динамический спектр вариаций профилей линий  $H\gamma$  и  $H\beta$  в спектре  $\alpha^2$  CVn. Видны регулярные изменения профилей линий со временем. Присутствуют как вариации на шкале времени около 30 мин, так и быстрые вариации на минутной шкале.

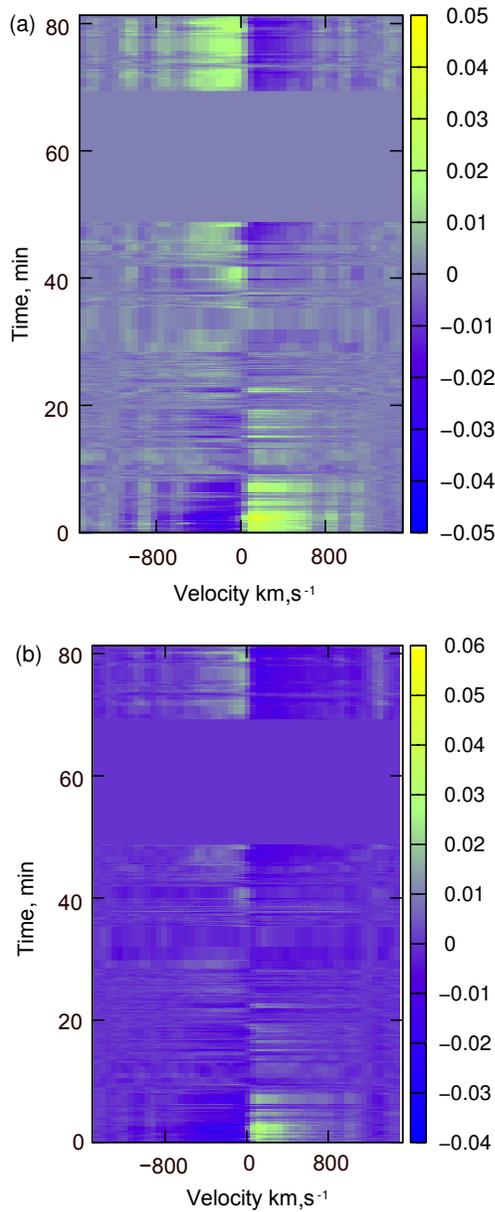
Для поиска регулярных компонент вариации профилей линий в спектре  $\alpha^2$  CVn нами был выполнен их Фурье-анализ методом CLEAN (Roberts et al. 1987).

Фурье-спектры вариаций разностных профилей линий  $H\gamma$  и  $H\beta$  (периодограммы) представлены на рис. 7. В Фурье-спектрах видны регулярные компоненты с частотами  $\nu_1 = 0.033 \text{ мин}^{-1}$  (период порядка 30 мин),  $\nu_2 = 0.024 \text{ мин}^{-1}$  (период около 42 мин) и  $\nu_3 = 0.0083 \text{ мин}^{-1}$  (период примерно 120 мин). Такие же пики обнаружены нами в Фурье-спектрах других линий бальмеровской серии водорода и линий He I.

### 3.1.1. Оконное Фурье-преобразование

Описанный выше анализ временных рядов изменений профилей линий в спектре  $\alpha^2$  CVn показал, что в динамических спектрах вариаций профилей линий видны быстрые изменения профилей на шкалах 1–3 мин. При построении периодограммы для всех исследуемых спектров  $\alpha^2$  CVn в Фурье-спектре вариаций профилей линии обнаруживаются только регулярные компоненты с периодами больше 30 мин.

В то же время при анализе коротких отрезков этих временных рядов в Фурье-спектрах находятся периодические компоненты с существенно меньшими периодами. По этой причине мы использовали для поиска короткопериодических компонент



**Рис. 3.** Динамический спектр вариаций профиля линии  $H\gamma$  (a) и  $H\beta$  (b).

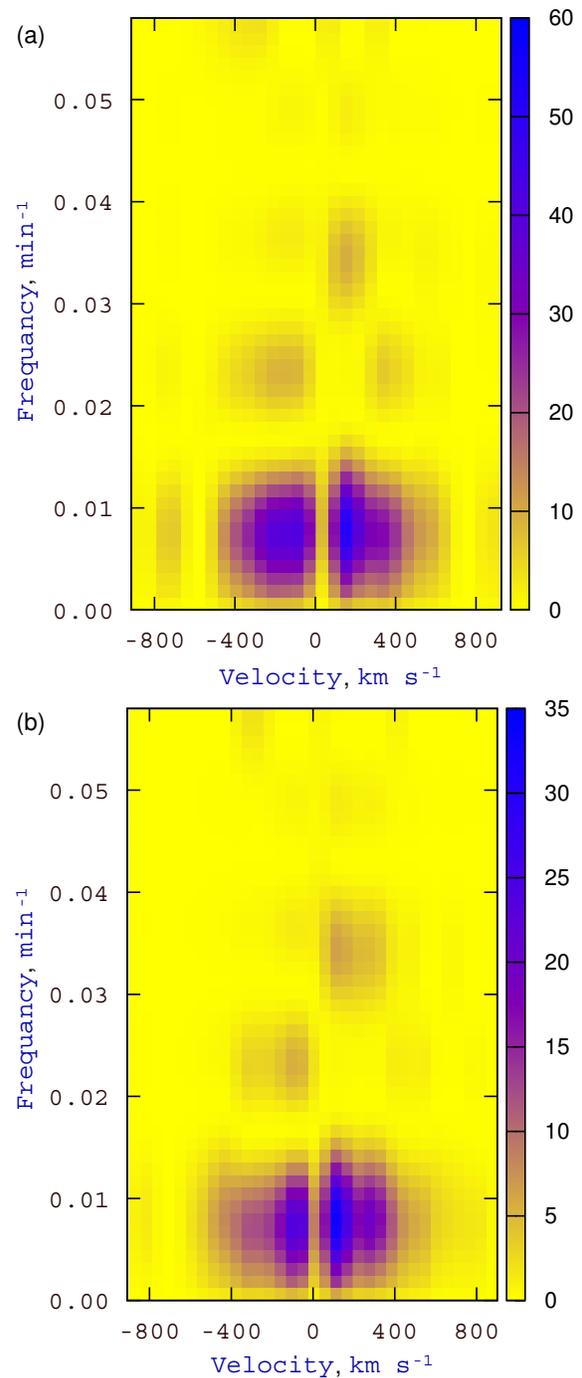
вариаций профилей оконное преобразование Фурье (см., например, Daubechies 1992):

$$F(t_0, \Delta T, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) W(\tau - t_0, \Delta T) e^{-i2\pi\nu\tau} d\tau, \quad (2)$$

где в качестве функции  $W(t)$  используется оконная функция Хэмминга (Poularikas 1998, p. 137):

$$W(t, \Delta T) = a_0 - (1 - a_0) \cos\left(\frac{2\pi t}{\Delta T}\right), \quad (3)$$

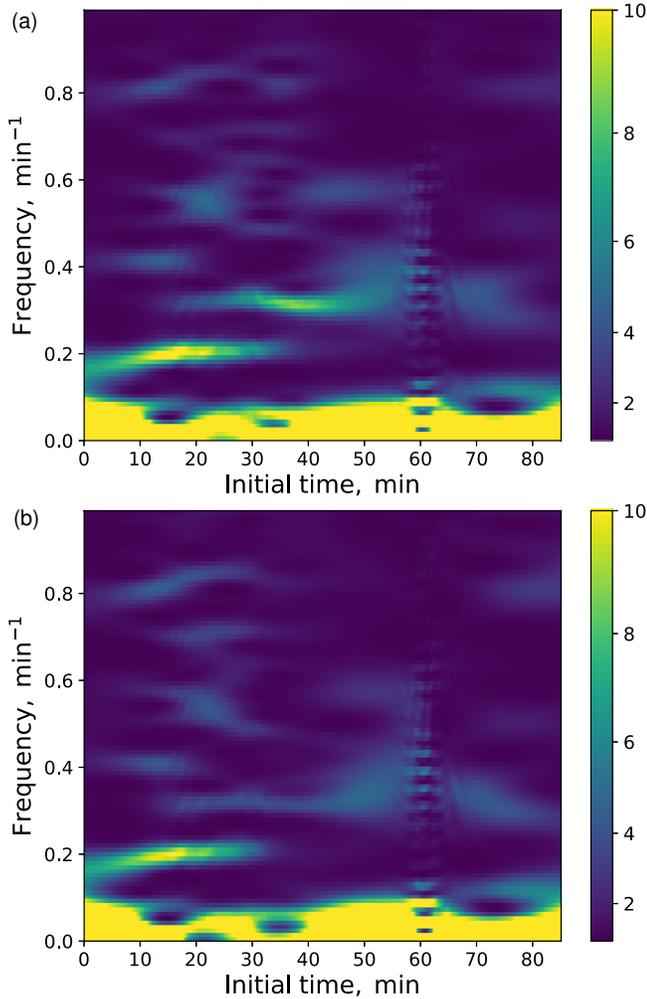
при  $t = t_k$ , где  $k = 1, 2, \dots, N$ . Здесь  $N$  — полное



**Рис. 4.** Фурье-спектр вариаций профиля линии  $H\gamma$  (a) и  $H\beta$  (b).

число анализируемых спектров,  $a_0 = 0.53836$ . Вне интервала  $[t_1; t_N]$  оконная функция  $W(t, \Delta T) = 0$ .

Фурье-спектр, получаемый в результате использования оконного преобразования, зависит от трех параметров: частоты  $\nu$ ,  $t_0$  — центра окна и  $\Delta T$  — ширины окна для каждого из значений  $V$  — доплеровского смещения от центральной длины волны линии.



**Рис. 5.** Оконный Фурье-спектр вариаций профиля линий H $\gamma$  (a) и H $\beta$  (b) для ширины окна  $\Delta T = 30$  мин для частот в мин $^{-1}$  в зависимости от положения центра окна от начала наблюдений.

Для полного профиля мы имеем функцию четырех переменных:  $F(t_0, \Delta T, \nu) \rightarrow F(t_0, \Delta T, \nu, V)$ . Такую функцию весьма сложно анализировать, поэтому мы просуммировали значения указанной функции для всех доплеровских смещений  $V$  в пределах профиля линии:

$$\mathcal{H}(t_0, \Delta T, \nu) = \sum_{k=1}^M g_k F^2(t_0, \Delta T, \nu, V_k), \quad (4)$$

где суммирование выполнено для всех  $M$  значений  $V_k$  внутри профиля соответствующей линии.

Статистический вес для значения  $V = V_k$ :

$$g_k = \int_{\nu_0}^{\nu_c} F^2(t_0, \Delta T, \nu, V_k), \quad (5)$$

где  $\nu_0 = 0.1$  мин $^{-1}$  и  $\nu_c = N/(2T)$  — частота Найквиста. Здесь  $N$  — полное число отсчетов временного ряда,  $T$  — его длина.

На рис. 5 представлена амплитуда оконного Фурье-преобразования  $\mathcal{H}(t_0, \Delta T, \nu)$  для линий H $\gamma$  и H $\beta$  в спектре  $\alpha^2$  CVn для частот в интервале  $[0; 1]$  мин $^{-1}$ .

В нижней части оконных Фурье-периодограмм хорошо видны регулярные компоненты вариаций профилей, обнаруженные при анализе всех полученных нами спектров  $\alpha^2$  CVn. В то же время, кроме этих компонент, обнаруживается хорошо выраженная компонента с переменной частотой от  $\nu = 0.18$  мин $^{-1}$  до  $\nu = 0.22$  мин $^{-1}$  со средним периодом  $P \sim 5$  мин). При  $t_0 > 35$  мин данная компонента исчезает.

Кроме того, на периодограммах видна более слабая компонента с частотой  $\nu \approx 0.32$  мин $^{-1}$  ( $P \approx 3.1$  мин). Возможно также присутствие очень слабых компонент в области частот  $[0.4; 0.85]$  мин $^{-1}$  (периоды  $1.2 \leq P \leq 2.5$  мин). Для подтверждения их реальности требуется получение спектров с более высоким временным разрешением и отношением  $S/N$ . Такие же, как описано выше, регулярные компоненты обнаружены нами в оконных Фурье-спектрах линии H $\delta$ .

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Все обнаруженные нами регулярные компоненты вариации профилей линий в спектре  $\alpha^2$  CVn приведены в таблице 2. Для оценки сверху ошибки  $\Delta\nu$  частот регулярных компонент Фурье-спектра использовалось выражение  $\Delta\nu \leq 1/T$  (Vityazev 2001), где  $T = 108$  мин — полная длительность наблюдений.

**Таблица 2.** Частоты и периоды регулярных вариаций профилей в спектре  $\alpha^2$  CVn

№ комп.	$\nu$ , мин $^{-1}$	$P$ , мин
1	$0.0074 \pm 0.009$	$135 \pm 164$
2	$0.0191 \pm 0.009$	$52 \pm 25$
3	$0.0308 \pm 0.009$	$32.5 \pm 9.5$
4	$0.0564 \pm 0.009$	$17.7 \pm 2.8$
5	0.18–0.22	4.5–5.6
6	$\approx 0.32$	$\approx 3.1 \pm 0.1$

Значение  $P_1 > T$ , поэтому его реальность должна быть подтверждена дополнительными наблюдениями, охватывающими больший промежуток времени.

Регулярные вариации профилей линий в спектрах ОВ-звезд с периодами  $P = 4^h - 6^h$  связаны, вероятнее всего, с нерадиальными пульсациями звезды в квадрупольной ( $l = 2$ ) и более высоких модах пульсаций (Pamyatnykh 1999). Обнаружение изменений профилей линий в области коротких периодов  $P = 30^m - 150^m$  может свидетельствовать о присутствии высоких мод нерадиальных пульсаций с  $l = 6 - 12$ .

Использование оконного Фурье-преобразование показало наличие в вариациях профилей линий в спектре  $\alpha^2$  CVn короткопериодических регулярных компонент с переменной частотой. Подобные компоненты ранее были нами обнаружены в вариациях спектров  $\rho$  Leo (Kholtygin et al. 2018).

Присутствие компонент вариаций профилей линий с короткими периодами в спектре HD 93521 было нами ранее интерпретировано как свидетельство существования высоких мод НРП с  $l = 20 - 60$  (Kholtygin et al. 2017). Однако присутствие высоких мод НРП не объясняет переменность частот регулярных компонент вариаций профилей. Можно интерпретировать наличие таких компонент в регулярных вариациях профилей линий при предположении, что высокие моды нерадиальных пульсаций нестабильны и могут как возникать, так и затухать на коротких временных промежутках в 10–100 мин, как мы ранее предположили при анализе быстрых вариаций профилей линий в спектрах  $\rho$  Leo (Kholtygin et al. 2018).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследованы вариации профилей линий в спектре звезды  $\alpha^2$  CVn с высоким временным разрешением. Обнаружены регулярные компоненты вариаций профилей с периодами  $P \sim 30 - 135$  мин. Использование оконного преобразования Фурье позволило зарегистрировать транзиентные компоненты вариаций профилей в области периодов порядка 3–6 мин.

Следует отметить, что, в принципе, вклад в вариации профилей линий в спектре звезды может внести спорадическое изменение размера турбулентного диска звезды вследствие атмосферных флуктуаций. В то же время трудно ожидать, что вызванные влиянием атмосферных флуктуаций вариации профилей будут регулярными. Однако нельзя полностью исключить влияние таких флуктуаций на нерегулярные вариации профилей. Для оценки такого влияния в будущем предполагается выполнение одновременных наблюдений спектров звезд сравнения, расположенных на щели вблизи программных звезд.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящее исследование поддержано грантом РФФИ 19-02-00311 А. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Aerts, D. M. Bowman, S. Simon-Diaz, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476** (1), 1234 (2018).
2. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005).
3. I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets* (SIAM, 1992).
4. V. V. Dushin, A. F. Kholtygin, G. A. Chuntunov, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **68** (2), 184 (2013).
5. S. Hubrig, M. Schöller, and A. F. Kholtygin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440** (2), 1779 (2014).
6. L. Kaper, H. F. Henrichs, A. W. Fullerton, et al., *Astron. and Astrophys.* **327**, 281 (1997).
7. A. F. Kholtygin, A. A. Batrakov, S. N. Fabrika, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 471 (2018).
8. A. F. Kholtygin, S. Hubrig, V. V. Dushin, et al., *ASP Conf. Ser.* **510**, 299 (2017).
9. A. F. Kholtygin, D. N. Monin, A. E. Surkov, and S. N. Fabrika, *Astronomy Letters* **29**, 175 (2003).
10. V. M. Kuvshinov and S. I. Plachinda, *Izvestiya Krymskoj Astrofiz. Obs.* **66**, 154 (1983).
11. A. A. Pamyatnykh, *Acta Astronomica* **49**, 119 (1999).
12. A. Poularikas (ed.), *Handbook of Formulas and Tables for Signal Processing* (CRC Press, Boca Raton, 1998).
13. D. H. Roberts, J. Lehar, and J. W. Dreher, *Astron. J.* **93**, 968 (1987).
14. J. Robrade and J. H. M. M. Schmitt, *Astron. and Astrophys.* **531**, A58 (2011).
15. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (2), 178 (2018).
16. J. Sikora, G. A. Wade, J. Power, and C. Neiner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (2), 2300 (2019a).
17. J. Sikora, G. A. Wade, J. Power, and C. Neiner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (3), 3127 (2019b).
18. J. Silvester, O. Kochukhov, and G. A. Wade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444** (2), 1442 (2014).
19. В. В. Витязев *Анализ неравномерных временных рядов* (Изд-во СПбГУ, С.-Петербург, 2001).

**Super-Fast Line-Profile Variability in the Spectra of OBA Stars. II. A0 Star  $\alpha^2$  CVn****A. F. Kholtygin, A. A. Batrakov, S. N. Fabrika, A.F Valeev, A.E. Kostenkov, and O. A. Tsiopa**

This study continues the investigation of the super-fast variability of line profiles in the spectra of stars of early spectral classes performed in 2017 and 2018. We investigated the variability of line profiles in the spectra of OBA stars with the SCORPIO multi-mode focal reducer at the 6-m SAO RAS telescope (BTA). Short-period regular variations of the H and He lines were detected in the spectra of the chemically peculiar A0Vp star  $\alpha^2$  CVn with periods ranging from approximately 30 to 135 minutes. Using the windowed Fourier transform let us detect the transient quasi-regular variations in the Balmer-line profiles with periods of 3–6 minutes. We discuss a possible origin of fast spectral variations.

Keywords: *stars: magnetic field—stars: chemically peculiar—stars: individual:  $\alpha^2$  CVn*