

УДК 524.312

## МИКРОПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ ОБ-ЗВЕЗД: СВЕРХГИГАНТ $\lambda$ Сер (O6If(n))

© 2011 г. А. Ф. Холтыгин<sup>1\*</sup>, Н. П. Судник<sup>1</sup>, Т. Е. Бурлакова<sup>2</sup>, Г. Г. Валявин<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Учреждение Российской академии наук Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
п. Нижний Архыз Карачаево-Черкесской Республики, Россия

<sup>3</sup>Национальная астрономическая обсерватория,  
Энсенада, Нижняя Калифорния, Мексика

Поступила в редакцию 24.03.2011 г.; принята в печать 11.04.2011 г.

Проведены наблюдения яркого сверхгиганта  $\lambda$ Сер спектрального класса O6If(n) на 6-м телескопе БТА САО РАН в 1997 г. и на 1.8-м телескопе Бохьонсанской оптической астрономической обсерватории (Южная Корея) в 2007 г. Получено 90 спектров звезды с высоким временным разрешением 10 мин, отношением сигнал/шум 150–300 и спектральным разрешением 45 000–60 000. Обнаружена переменность профилей линий H, HeI и HeII. Предположена связь обнаруженной переменности с нерадиальными фотосферными пульсациями и вращением звезды (вращательная модуляция профилей).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Практически все звезды ранних спектральных классов имеют переменные профили линий в их спектрах. Изменения профилей линий являются как регулярными или квазирегулярными, так и стохастическими (нерегулярными). Наблюдаемая регулярная переменность профилей связывается с нерадиальными пульсациями (НРП), переменностью ветра, вращением звезд, образованием околозвездных дисков и струй вещества. По спектральным наблюдениям горячих звезд в рентгеновском [1, 2], ультрафиолетовом (УФ) [3, 4] и видимом [4–9] диапазонах обнаружена нерегулярная переменность профилей линий. Такая переменность свидетельствует о присутствии в атмосферах этих звезд мелкомасштабных структур разных размеров и плотностей с временами жизни от долей часа до нескольких дней. Образование мелкомасштабных структур связано с радиационной неустойчивостью ветра [10].

В качестве одной из причин формирования крупномасштабных структур предполагается наличие в фотосфере областей с различными скоростями и темпами истечения вещества. Образование подобных областей связывается с нерадиальными пульсациями O-звезд [9].

Одним из факторов, способствующим образованию крупномасштабных структур в атмосфере O-звезд, возможно, является слабое (несколько сотен гаусс на поверхности звезды) магнитное поле [11]. В настоящее время магнитное поле достаточно надежно обнаружено примерно у 20 звезд спектрального класса O [12–15] и у большого числа звезд ранних подклассов спектрального класса B [16, 17].

В отличие от звезд спектрального класса B, амплитуда вариаций профилей линий в спектрах звезд спектрального класса O относительно мала (1%–3%; см., например, [18]), так что следует говорить скорее о *микрпеременности* профилей линий в спектрах этих звезд. Обнаружение и, тем более, выяснение природы переменности требует проведения наблюдений с высоким временным и спектральным разрешениями и высоким отношением сигнал/шум ( $\geq 300$ ).

Настоящая статья является продолжением исследования микрпеременности горячих звезд, начатого нами в статьях [18–20], в которых представлены результаты исследования переменности профилей линий в спектрах OB-звезд  $\lambda$ Сер,  $\alpha$ Cam,  $\lambda$ Og1 A,  $\delta$ Og1 A,  $\rho$ Leo и  $\iota$ Her. В данной работе представлены результаты спектральных наблюдений яркого сверхгиганта  $\lambda$ Сер спектрального класса O6.

\*E-mail: afkholtygin@gmail.com

Таблица 1. Параметры  $\lambda$ Сер

Параметр	Значение	Ссылка
$d$ , кпк*	0.9	[33]
	1.587	[34]
$\lg(L/L_{\odot})$	5.83	[32]
$L_{\text{bol}}$ , эрг/с	39.32	[35]
$T_{\text{eff}}$ , К	36 000	[32, 33]
$M/M_{\odot}$	62.2	[32]
$R/R_{\odot}$	21.1	[32, 33]
$\lg g$	3.58	[32]
$-\lg \frac{\dot{M}}{M_{\odot}}$ (год $^{-1}$ )	5.57	[33]
$V \sin i$ , км/с	200	[32]
$V_{\infty}$ , км/с	2250	[32, 33]
$Y_{\text{He}}$	0.10	[32]

\* Расстояние  $d = 0.9$  кпк было определено по стандартной формуле  $d = V - M_v - 3.1E(B - V)$  [33]. Значение 1.587 кпк было получено из анализа эквивалентных ширин межзвездных линий H и K CaII [34].

Изменение формы и интенсивности эмиссионных особенностей в оптическом диапазоне спектра  $\lambda$ Сер отмечено многими наблюдателями. Особенно интенсивно изучалась переменность двугорбой эмиссионной линии HeII  $\lambda 4686 \text{ \AA}$ . Конти и Фрост [21] и Лип и Конти [22] связывали наблюдаемое изменение интенсивности фиолетового и красного эмиссионного пиков и переменность центрального абсорбционного компонента этой линии с переменностью неоднородного ветра звезды. Похожее поведение профилей наблюдалось в линии N $\alpha$  [21, 23]. Хатчингс и Саньял [24] указали на переменность профиля линии NIII  $\lambda 4640 \text{ \AA}$ . Фуллертон [25] обнаружил переменность профилей линий HeI и CIV в оптическом диапазоне. Хенрикс и др. [26], наблюдая поведение профилей линий ионов N V, SiIV, CIV в УФ-диапазоне и HeI и HeII в оптическом диапазоне, пришли к заключению, что между переменностью профилей линий N V, CIV и HeII существует связь. Они также указали на то, что причиной переменности глубокой фотосферной линии HeI  $\lambda 4713 \text{ \AA}$  являются НРП.

Последующие исследования  $\lambda$ Сер выявили переменность профилей, как эмиссионных, так и абсорбционных линий, в спектре звезды на различных временных масштабах (см., например, [3, 4, 6, 8, 27]). Для объяснения наблюдаемой переменности горячих O-звезд и вызывающих ее механизмов

были предложены различные модели их атмосфер и ветров (см., например, [4, 6, 28–32]).

В настоящей работе проанализированы спектральные наблюдения яркого сверхгиганта  $\lambda$ Сер спектрального класса O6, проведенные в 1997 г. в САО РАН на БТА, и спектрополяриметрические наблюдения этой звезды, полученные в Бохьюнсанской оптической астрономической обсерватории (БОАО, Южная Корея). Во втором разделе работы представлены основные сведения о звезде и описаны выполненные нами наблюдения. Анализ изменений профилей линий описан в третьем разделе. В четвертом разделе изложены результаты поиска магнитного поля звезды. Пятый раздел посвящен обсуждению полученных результатов.

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

Сверхгигант  $\lambda$ Сер (HD 210839) является быстровращающейся звездой ( $V \sin i = 200$  км/с [32]) спектрального класса O6If(n).

На диаграмме Герцшпрунга–Рессела  $\lambda$ Сер находится в области переменных звезд типа  $\beta$ Сер. Параметры звезды представлены в табл. 1, где  $d$  – расстояние до звезды,  $L$  – светимость звезды,  $L_{\text{bol}}$  – болометрическая светимость звезды,  $T_{\text{eff}}$  – эффективная температура звезды,  $M$  – масса звезды,  $R$  – радиус звезды,  $g$  – ускорение силы тяжести на поверхности звезды,  $\dot{M}$  – скорость потери массы звездой,  $V \sin i$  – скорость вращения звезды,  $V_{\infty}$  – терминальная скорость звездного ветра,  $Y_{\text{He}}$  – относительное содержание гелия.

Звезда наблюдалась нами в 1997 и 2007 гг. Сведения о выполненных наблюдениях даны в табл. 2. В 1997 г. наблюдения были проведены на БТА САО со спектрографом “Рысь” [36] и матрицей  $512 \times 512$  пикс. Спектральное разрешение – 60 000. Первичная редукция полученных ПЗС-изображений эшелных спектров была сделана в среде MIDAS. Типичное отношение сигнал/шум составило 200–300.

В 2007 г. в Бохьюнсанской оптической астрономической обсерватории (БОАО, Южная Корея) были выполнены спектрополяриметрические наблюдения  $\lambda$ Сер. Спектры были получены на спектрографе BOES [37] 1.8 м телескопа БОАО с матрицей  $2048 \times 4096$  пикс. в диапазоне длин волн 3830–8260  $\text{\AA}$  со спектральным разрешением 45 000 и отношением сигнал/шум 120–450. Обработка спектров проводилась в среде IRAF.

Все полученные спектры единым образом нормировались на континуум. Процедура проведения континуума описана в работе Холтыгина и др. [20].

Таблица 2. Наблюдения  $\lambda$ Сер в 1997 и 2007 гг.

Дата	Число спектров	Продолжительность экспозиции, мин	Полное время наблюдений, ч	Телескоп	Спектрограф, размер матрицы в пикс.
14.08.1997	4	5	0.7	САО, БТА	Lynx, 512 × 512
15.08.1997	38	4–5	5.0	САО, БТА	Lynx, 512 × 512
16.08.1997	28	2–4	2.1	САО, БТА	Lynx, 512 × 512
20.11.2007	8	3–5	2.3	БОО, 1.8 м	BOES, 2048 × 4096
21.11.2007	8	3–5	1.8	БОО, 1.8 м	BOES, 2048 × 4096
22.11.2007	8	3–5	1.7	БОО, 1.8 м	BOES, 2048 × 4096
16.12.2007	6	3–5	1.4	БОО, 1.8 м	BOES, 2048 × 4096

### 3. ВАРИАЦИИ ПРОФИЛЕЙ. ПОИСК РЕГУЛЯРНОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ

#### 3.1. Вариации средних профилей. Разностные профили

Для анализа регулярной переменности профилей мы использовали неблендированные линии, остаточная интенсивность которых  $r < 0.9$ . Это линии HeII  $\lambda 4199.87 \text{ \AA}$ , HeII  $\lambda 4541.591 \text{ \AA}$ , HeII  $\lambda 4685.682 \text{ \AA}$ , HeII  $\lambda 5411.521 \text{ \AA}$ , HeI  $\lambda 4026.1912 \text{ \AA}$ , HeI  $\lambda 4471.479 \text{ \AA}$ , HeI  $\lambda 5875.621 \text{ \AA}$ , H $\delta$   $\lambda 4101.737$ , H $\gamma$   $\lambda 4340.468$  и H $\beta$   $\lambda 4861.332$ .

Профили линий в спектре звезды  $\lambda$ Сер заметно меняются на временных масштабах около часа. Для иллюстрации данных вариаций мы разбили профили, полученные 15 августа 1997 г., на 4 группы. В первых трех группах содержатся по 10 профилей и в последней — 8. Для каждой группы были вычислены средние профили. Полученные средние профили представлены на рис. 1. Хорошо видны существенные изменения профилей с амплитудой 2%–3% от уровня континуума в области линии.

Для детального исследования переменности профилей всех выбранных линий нами были построены их разностные профили (индивидуальный профиль линии минус средний). В качестве иллюстрации полученных результатов на рис. 2 представлены динамические разностные профили линии HeII  $\lambda 5411 \text{ \AA}$  в шкале доплеровских смещений от центра линии. Отклонения индивидуальных профилей от среднего по всем спектрам показаны оттенками серого.

На рисунке видно присутствие широкой (примерно 100 км/с) переменной детали, появляющейся со скоростью  $\approx -200$  км/с вблизи фиолетовой границы полосы  $\pm V \sin i$  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 [19, 20, 38].

В крыле линии HeII  $\lambda 5411 \text{ \AA}$  видна слабая линия SiI  $\lambda 5405.3 \text{ \AA}$  (рис. 1). Вариации профилей данной линии коррелируют с изменениями профилей более сильной линии HeII  $\lambda 5411 \text{ \AA}$ , что наглядно видно на рис. 2.

#### 3.2. TVS-анализ

Для выяснения вопроса о переменности профилей линий при отсутствии заметных на глаз их изменений часто используется методика, предложенная Фуллертоном и др. [39] — анализ спектра временных вариаций (Temporal Variance Spectrum — TVS-анализ). Если амплитуда переменности профилей линий достаточно велика, то величина TVS в линии существенно превышает ее значения в области соседнего с линией континуума. Если же амплитуда переменности профилей мала или мало число полученных спектров, то TVS-анализ не дает определенного ответа на вопрос, является ли профиль данной линии переменным или нет. Поэтому мы использовали модифицированную версию TVS-анализа — анализ сглаженного (smoothed) спектра временных вариаций (smTVS), описанную в работе Холтыгина и др. [20]. Сглаженный smTVS-спектр представляется выражением

$$\text{smTVS}(\lambda, S) = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n g_i \left( F_i(\lambda, S) - \overline{F(\lambda, S)} \right)^2 / \sum_{i=1}^n g_i \right],$$

где  $n$  — число полученных спектров,  $F_i(\lambda, S)$  — нормированный на континуум поток в  $i$ -том спектре на длине волны  $\lambda$ , сглаженный с гауссовым фильтром шириной  $S$ ,  $\overline{F(\lambda, S)}$  — усредненный по всем наблюдениям поток на длине волны  $\lambda$ ,  $g_i$  —

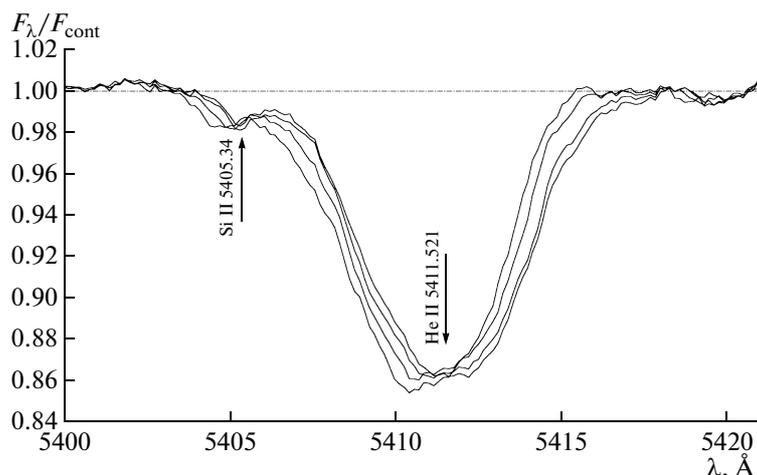


Рис. 1. Средние по группам профили линии He II  $\lambda 5411 \text{ \AA}$  в спектре звезды  $\lambda$ Сер, полученные 15 августа 1997 г.

относительный вес  $i$ -го наблюдения, обратно пропорциональный величине квадрата стандартного отклонения  $F_i(\lambda, S)$  в области длин волн вблизи линии, переменность профиля которой исследуется.

Величина smTVS при  $S = 0$  соответствует величине TVS, введенной в работе [39].

На рис. 3 представлены значения smTVS для линии He II  $\lambda 4200 \text{ \AA}$  при различных ширинах фильтра  $S$ . Темным областям соответствует большая амплитуда переменности. На диаграмме хорошо видна переменность профилей линии He II  $\lambda 4200 \text{ \AA}$  для всех ширин фильтра. При ширине фильтра, большей  $1 \text{ \AA}$  становится заметной переменность профилей слабых линий C III  $\lambda 4187 \text{ \AA}$  и Si IV  $\lambda 4212 \text{ \AA}$ , не обнаружимая другими методами. То же видно и из рис. 4, иллюстрирующего сглаженный (внизу) и несглаженный (вверху) спектры временных вариаций. К сожалению, при больших ширинах фильтра используемая нами методика не позволяет точно определить положение переменных деталей слабых линий в спектре звезды.

### 3.3. Поиск регулярной переменности

С целью поиска периодических компонентов вариаций профилей нами был выполнен фурье-анализ переменности профилей всех указанных выше линий в спектре звезды  $\lambda$ Сер. Для очистки фурье-спектра от ложных пиков использовалась модифицированная версия алгоритма CLEAN [40], описанная Витязевым [41].

Для каждой из изучаемых линий были построены временные ряды разностных потоков:

$$\Delta F(t, V) = F(t, V) - \overline{F(V)},$$

где  $F(t, V)$  — значение интенсивности профиля линии в момент наблюдения  $t$  для доплеровского смещения от центра линии  $V$ , а  $\overline{F(V)}$  — средняя по всем спектрам интенсивность, соответствующая данному значению  $V$ .

Процедура CLEAN применялась для всех полученных значений  $V$  в пределах профиля исследуемой линии. Для сглаживания шумового компонента переменности профиля значения  $\Delta F(t, V)$  усреднялись в спектральном окне ширины  $\Delta V = 6 \text{ км/с}$ . Результаты расчетов показали, что выбор различных значений  $\Delta V$  практически не влияет на полученные в результате сглаживания фурье-спектры.

**3.3.1. Фурье-анализ спектров, полученных в САО.** К сожалению, для спектров, полученных в САО, временные отсчеты были записаны только для ночи 15 февраля 1997 г. По этой причине мы ограничимся анализом вариаций 38 профилей линий, полученных в эту ночь.

На рис. 5 представлены контурные графики квадрата модуля амплитуды фурье-преобразования (фурье-спектры) для линии He II  $\lambda 5411 \text{ \AA}$ . При построении диаграммы плотности спектра мощности фурье-преобразования для наглядности были использованы только значения периодограммы, соответствующие малому уровню значимости  $q = 10^{-7}$  гипотезы о присутствии сильного пика белого шума в периодограмме.

На рисунке видно присутствие широкого пика на частоте  $\nu \approx 3-4 \text{ сут}^{-1}$ , соответствующей периодам переменности профилей от  $6^{\text{h}}$  до  $8^{\text{h}}$ . Положение данного пика в пределах ошибок соответствует значению  $\nu \approx 3.64 \text{ сут}^{-1}$ , обнаруженному в вариациях профиля линии He I  $\lambda 4713 \text{ \AA}$  в работе [8].

**3.3.2. Фурье-анализ спектров, полученных в БОАО.** Для спектров, полученных в БОАО, фурье-анализ выявил регулярные компоненты в области частот от  $0.3 \text{ сут}^{-1}$  до  $6.9 \text{ сут}^{-1}$ , соответствующие периодам  $0.4^{\text{h}} - 3.4^{\text{d}}$ . Периодограмма фурье-спектров для всех линий спектра  $\lambda$ Сер представлена на рис. 6. Для наглядности на периодограмме представлены только значения амплитуды фурье-спектров, соответствующие малому уровню значимости  $q = 10^{-3}$  гипотезы о присутствии сильного пика белого шума в периодограмме. Для удобства мы нанесли на периодограмму положения найденных на данном уровне значимости  $q$  компонентов фурье-спектра для всех рассматриваемых нами линий H I, He I, He II, список которых приведен в подразделе 3.1.

Регулярные компоненты, встречающиеся в фурье-спектрах трех и более линий, представлены в табл. 3. В таблицу не включены компоненты с частотами  $\nu > 8 \text{ сут}^{-1}$ , которые обнаруживаются только при использовании значения  $q = 0.05$ . Большинство из них лежит вне полосы  $V \sin i$  и встречается в фурье-спектрах только одной или двух линий. Поэтому они, скорее всего, являются ложными пиками, связанными со случайными выбросами периодограмм шумового компонента сигнала.

Сравнивая частоты вариаций профилей линий, найденные в 1997 и 2007 гг., можно сделать заключение, что в пределах ошибок определения они согласуются. Частоте  $\nu \approx 3 - 4 \text{ сут}^{-1}$  (период  $6^{\text{h}} - 8^{\text{h}}$ ) соответствуют частоты  $2.6 \pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$  ( $9.2^{\text{h}} \pm 1.2^{\text{h}}$ ) и  $4.1 \pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$  ( $5.9^{\text{h}} \pm 0.6^{\text{h}}$ ).

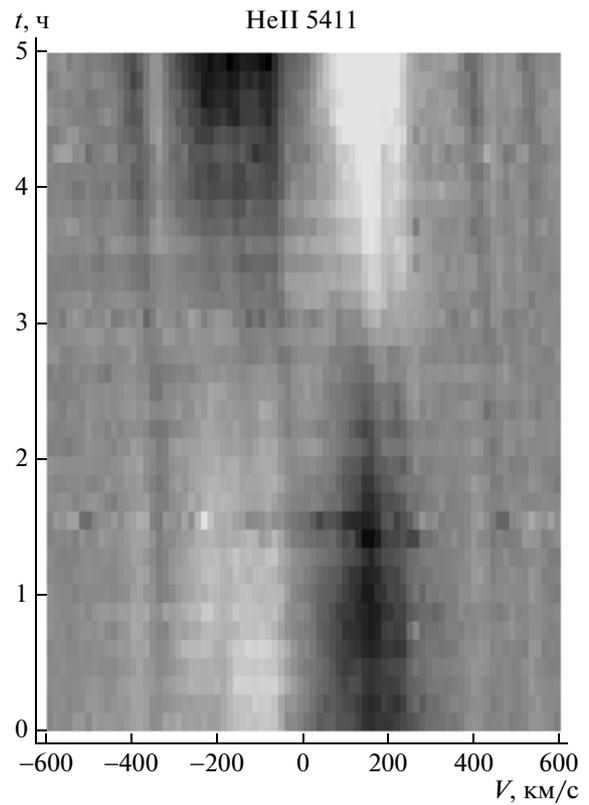
#### 4. ПОИСК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Спектры  $\lambda$ Сер, полученные в БОАО, имеют достаточно низкое отношение сигнал/шум ( $S/N = 200 - 300$ ), поэтому обычные методы поиска магнитного поля малоэффективны. По этой причине мы использовали предложенный в работе [42] метод определения магнитного поля, основанный на применении сглаживания с гауссовым фильтром  $G_s(W, S)$  переменной ширины  $S$  к формуле Бэбкока

$$V(W) = -\overline{\Delta W}_B \frac{dI(W)}{dW} = \quad (1)$$

$$= -\mathcal{R}_0 g_{\text{eff}} \lambda_0 \overline{B}_l \frac{dI(W)}{dW},$$

связывающей значения параметра Стокса  $V$  с производной  $dI(W)/dW$  по профилю линии в пространстве скоростей  $W$ . Здесь  $g_{\text{eff}}$  — эффективный фактор Ланде для данной линии.



**Рис. 2.** Динамические спектры вариаций профилей линии He II  $\lambda 5411 \text{ \AA}$  в спектре звезды  $\lambda$ Сер для спектрограмм, полученных на БТА 15 августа 1997 г., в шкале доплеровских смещений от центра линии в км/с. Отклонения индивидуальных профилей линий от среднего показаны в негативном виде оттенками серого. Светлым областям на рисунке соответствуют участки профилей, лежащие ниже уровня среднего профиля, темным — выше. Интервал между последовательными спектрами — 7 мин. По оси ординат отложены временные отсчеты в часах от момента начала наблюдений.

Параметр

$$\mathcal{R}_0 = \frac{e}{4\pi m_e c} = \quad (2)$$

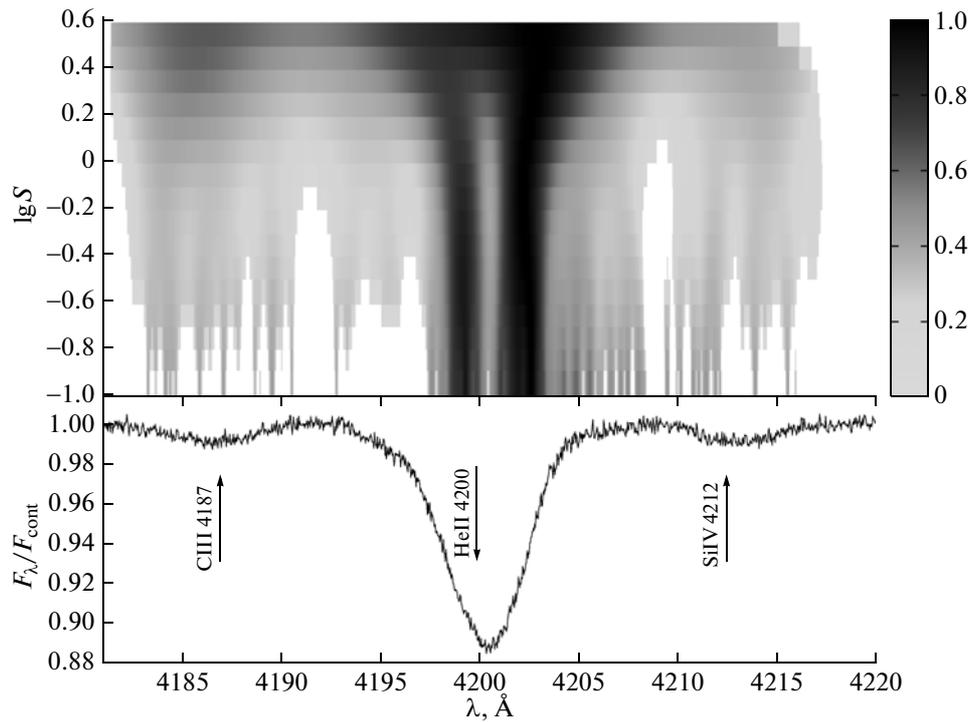
$$= 1.3996 \times 10^{-7} (\text{км/с}) \text{ \AA}^{-1} \text{ Гс}^{-1},$$

если длина волны рассматриваемой линии выражается в  $\text{\AA}$ , а скорость — в км/с.

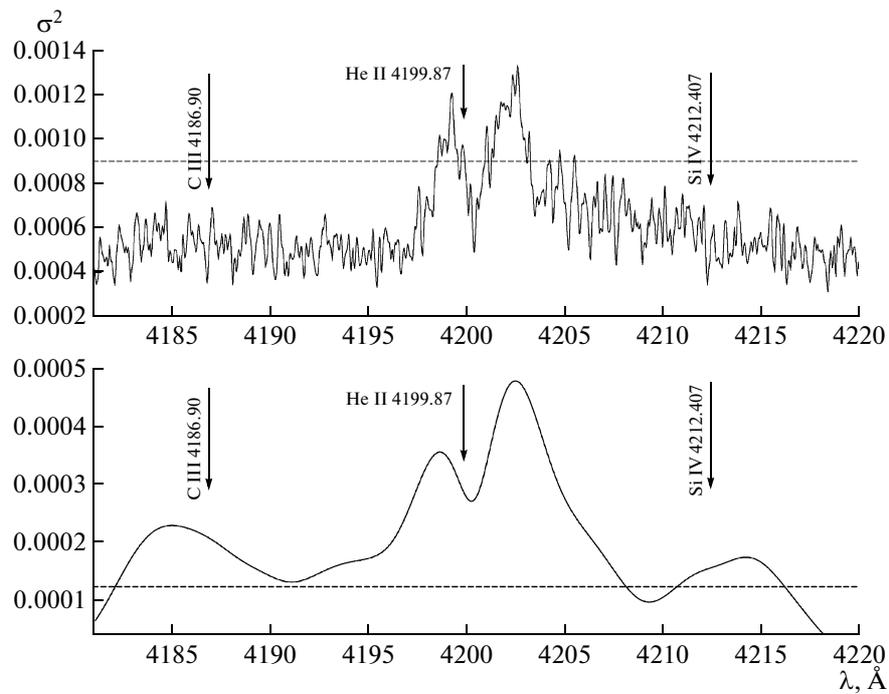
Применяя операцию сглаживания с гауссовым фильтром к обеим частям формулы (1), получим:

$$\overline{V}(u, S) = \overline{B}_l \frac{\mathcal{R}_0 g_{\text{eff}} \lambda_0}{S^3 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F^*(W)(u - W) \times \quad (3)$$

$$\times e^{-\frac{1}{2}(\frac{u-W}{S})^2} dW = \overline{B}_l J_W(u, S).$$



**Рис. 3.** Сглаженные вариации профиля линии He II  $\lambda 4200$  Å (smTVS) в зависимости от ширины фильтра  $S$  (вверху) и средний профиль этой линии (внизу). Темным областям соответствует большая амплитуда переменности. При ширине фильтра более 1 Å становится заметной переменность профилей слабых линий C III  $\lambda 4187$  Å и Si IV  $\lambda 4212$  Å.



**Рис. 4.** Величины TVS (вверху) и smTVS (внизу) для линии He II  $\lambda 4200$  Å. Ширина фильтра  $S = 1.6$  Å. Горизонтальная линия соответствует уровню значимости 0.001.

**Таблица 3.** Частоты ( $\nu$ ) и периоды ( $P$ ) регулярных компонентов в спектре звезды  $\lambda$ Сер. (Представлены только частоты, встречающиеся в фурье-спектрах вариаций профилей трех и более линий)

$\nu$ , сут <sup>-1</sup>	$P$ , сут	$P$ , ч	Найденные другими авторами			Тип пере- менности
			$\nu$ , сут <sup>-1</sup>	$P$ , сут	Ссылка	
$0.3 \pm 0.3$	3.4	82.6				Вр.мод.*
$0.6 \pm 0.3$	1.7	41.3				Вр.мод.
$0.7 \pm 0.3$	1.4	33.1	0.71	$1.4 \pm 0.2$	[4]	Вр.мод.
$0.9 \pm 0.3$	1.1	27.5	$0.84 \pm 0.06$	1.2	[6]	Вр.мод.
$1.4 \pm 0.3$	0.7	16.5	1.39	$0.72 \pm 0.03$	[4]	Вр.мод.
$1.6 \pm 0.3$	0.6	15.0		$0.6326 \pm 0.0004$	[45]	Вр.мод.
$2.2 \pm 0.3$	0.5	11.0				НРП
$2.3 \pm 0.3$	0.4	10.3				НРП
$2.5 \pm 0.3$	0.4	9.7				НРП
$2.6 \pm 0.3$	0.4	9.2				НРП
$4.1 \pm 0.3$	0.3	5.9				НРП
$4.5 \pm 0.3$	0.2	5.3				НРП
$6.9 \pm 0.3$	0.1	3.4				НРП

\* Вр.мод. — вращательная модуляция профилей линий.

Здесь  $\lambda_0$  — центральная длина волны линии в Å, а

$$\bar{V}(u, S) = \int_{-\infty}^{\infty} V^*(W) G_S(u - W) dW, \quad (4)$$

где

$$G_S(W) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{W}{S})^2}, \quad (5)$$

Функция

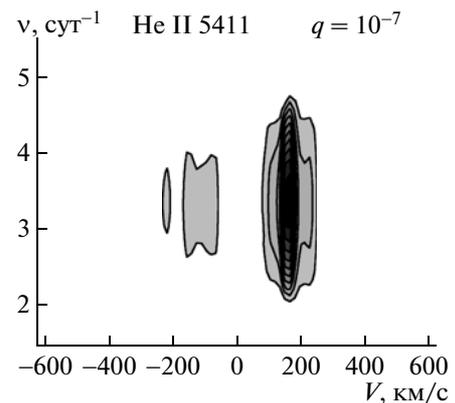
$$J_W(u, S) = \frac{\mathcal{R}_0 g_{\text{eff}} \lambda_0}{S^3 \sqrt{2\pi}} \times \int_{-\infty}^{\infty} F^*(W) (u - W) e^{-\frac{1}{2}(\frac{u-W}{S})^2} dW \quad (6)$$

пропорциональна амплитуде вейвлет-преобразования с WAVE-вейвлетом [43] от отсчитываемого от уровня континуума профиля линии  $F^*(W) = F^*(W) - I_c$ , где  $I_c$  — уровень континуума в пределах линии.

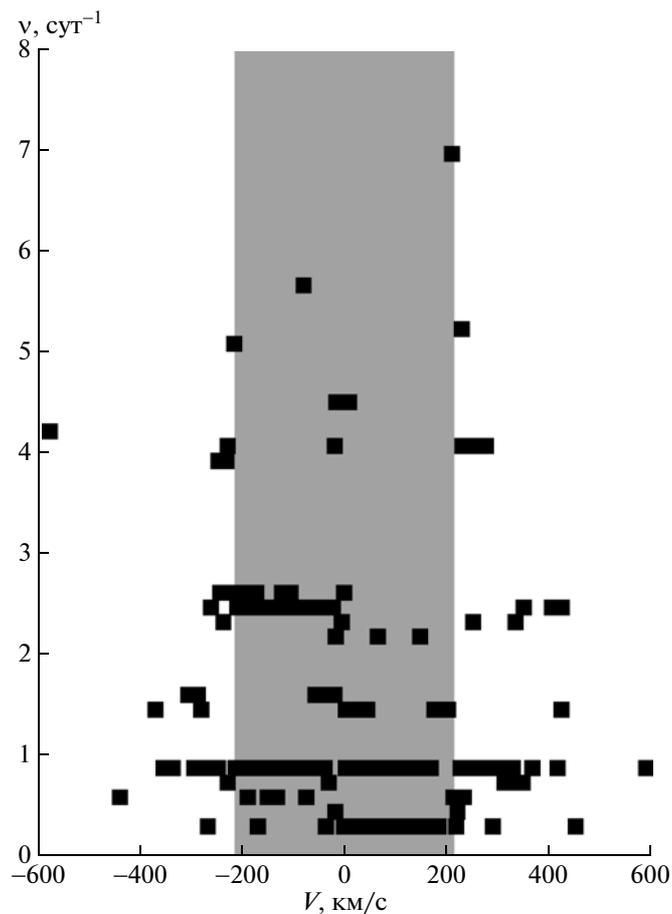
Соотношение (3) удобнее всего использовать в интегральном виде. Интегрируя формулу (3) в пределах профиля линии, получим:

$$\int_{-W_{\text{line}}}^{W_{\text{line}}} \bar{V}(u, S) du = \bar{B}_l \int_{-W_{\text{line}}}^{W_{\text{line}}} J_W(u, S). \quad (7)$$

Формула (7) использовалась нами для нахождения значения эффективного магнитного поля  $B_l$ . Мы использовали все линии в спектре  $\lambda$ Сер, глубина которых  $d_\lambda = 1 - r_\lambda > 0.1$ , где  $r_\lambda$  — остаточная интенсивность в центре линии.



**Рис. 5.** Фурье-спектры вариаций разностных профилей линии HeII  $\lambda 5411$  Å в спектре звезды  $\lambda$ Сер, полученные 15 августа 1997 г. в области частот  $\nu = 0-10$  сут<sup>-1</sup>. Представлены только значения амплитуды фурье-спектров, соответствующие уровню значимости гипотезы о присутствии сильного пика в периодограмме белого шума  $q = 10^{-7}$ . Более темные области на диаграмме соответствуют большим значениям амплитуды.



**Рис. 6.** Фурье-спектры вариаций разностных профилей линий в спектрах звезды  $\lambda$ Сер в области доплеровских смещений  $\Delta V = \pm 600$  км/с от центра линий, полученные из анализа наблюдений в БОАО в 2007 г. Каждый из темных квадратиков на графике соответствует положению найденного на уровне значимости  $q = 10^{-3}$  компонента фурье-спектра хотя бы для одной из линий из списка, приведенного в подразделе 3.1. Полоса  $V \sin i$  выделена серой заливкой.

Полученные значения величины  $B_l$  представлены на рис. 7. Ошибки в измеренных значениях поля слишком велики, поэтому можно сделать только оценку верхнего предела продольного компонента магнитного поля  $\lambda$ Сер:  $B_l \leq 1$  кГс.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате фурье-анализа переменности профилей линий в спектре  $\lambda$ Сер были найдены регулярные компоненты в интервале частот от  $0.3$  до  $6.9$  сут $^{-1}$  (с периодами  $0.4^h - 3.4^d$ ; табл. 3). Эти компоненты, скорее всего, связаны с вращательной модуляцией профилей и нерадиальными пульсациями звезды.

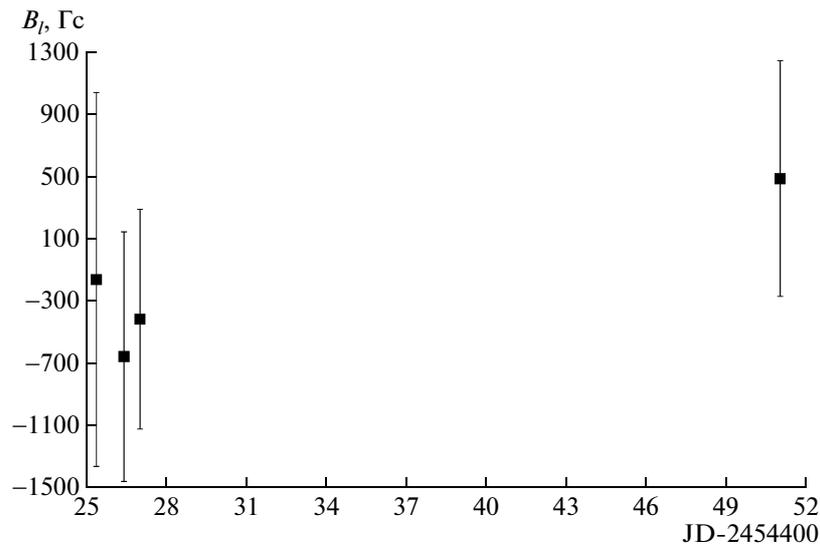
Компонент с наименьшей частотой  $\approx 0.3$  сут $^{-1}$  (период  $3.4^d$ ), возможно, соответствует периоду вращения звезды  $P_{rot}$ . Это значение совместимо с приводимыми в разных работах оценками периода вращения  $\lambda$ Сер, которые варьируются от  $2.4^d$  до  $4.5^d$  [4, 8, 44].

Переменность профилей линий с периодом 1–2 дня в спектрах O-звезд связывается с существованием в их атмосферах плотных коротационных газовых струй, вращающихся с угловой скоростью вращения звезды и простирающихся вплоть до расстояний в несколько радиусов звезды [6]. Изменения профилей вызываются дополнительным поглощением излучения звезды веществом струй при их попадании на луч зрения. Таким образом, период изменения профилей  $P_n$ , вызываемый существованием коротационных струй, равен

$$P_n = P_{rot}/n,$$

где  $P_{rot}$  – период вращения звезды,  $n$  – число струй в атмосфере.

В том случае, если период вращения  $\lambda$ Сер  $P_{rot} = 3.4^d$ , то периодические компоненты с частотой  $0.6 \pm 0.3$  сут $^{-1}$  (период  $1.7^d$ ) и  $0.9 \pm 0.3$  сут $^{-1}$  (период  $1.1^d$ ) можно объяснить наличием двух или трех струй вещества в атмосфере. Частоте  $0.9 \pm$



**Рис. 7.** Значения продольного компонента магнитного поля  $\lambda$ Сер, полученные по наблюдениям на 1.8-м телескопе БОАО в 2007 г.

$\pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$ , найденной в фурье-спектрах всех исследованных линий, соответствует частота  $0.84 \pm \pm 0.06 \text{ сут}^{-1}$ , полученная в результате анализа переменности профилей линии  $\text{H}\alpha$ , выполненного в работе [6].

Частоты  $2.3 \pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$  (период  $10.3^{\text{h}}$ ) и  $2.6 \pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$  (период  $9.2^{\text{h}}$ ) также являются гармониками частоты  $0.3 \text{ сут}^{-1}$ . Однако наличие 8–9 струй в атмосфере кажется маловероятным. Данные компоненты, скорее всего, связаны с НРП.

Регулярные компоненты с частотами  $0.7 \pm \pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$  (период  $1.4^{\text{d}}$ ),  $1.4 \pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$  (период  $0.7^{\text{d}}$ , который соответствует первой гармонике компоненты  $\nu = 0.7 \text{ сут}^{-1}$ ) и  $1.6 \pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$  (период  $0.6^{\text{d}}$ ) также связаны с вращательной модуляцией профилей. Период  $1.4^{\text{d}}$  совпадает с найденным в работе [4] характерным временем ( $1.4^{\text{d}} \pm 0.2^{\text{d}}$ ) повторяемости дискретных абсорбционных компонентов в профилях УФ-линий. В этой же работе указывается на возможность того, что вариации профилей линии  $\text{HeII}$  с периодом  $0.72^{\text{d}} \pm 0.03^{\text{d}}$  соответствуют первой гармонике компонента, ответственного за повторяемость дискретных абсорбционных компонентов. Найденному нами периоду  $0.6^{\text{d}}$  соответствует значение  $P = 0.6326^{\text{d}} \pm \pm 0.0004^{\text{d}}$ , полученное из анализа фотометрических наблюдений  $\lambda$ Сер, проводившихся на протяжении 3.5 лет на спутнике HIPPARCOS [45].

Переменность профилей линий с меньшими периодами ( $3.4^{\text{h}}\text{--}11^{\text{h}}$ ), скорее всего, связана с НРП. Еще более короткопериодические компоненты ( $0.4^{\text{h}}\text{--}3^{\text{h}}$ ) обнаруживаются только при уровне

значимости  $q = 0.05$ . Они регистрируются в фурье-спектрах только одной или двух линий и, в основном, лежат вне полосы  $V \sin i$ . Поэтому они, скорее всего, являются ложными пиками, связанными со случайными выбросами периодограммы шумового компонента сигнала.

Сведения о величине периодов вариаций профилей линий в спектре  $\lambda$ Сер в литературе крайне скудны. При анализе УФ-наблюдений, выполненных на спутнике IUE, кроме рекуррентного периода дискретных абсорбционных компонентов в резонансных линиях  $\text{SiIV}$  и  $\text{NIV}$  дополнительно был найден период  $P = 4.3^{\text{d}} \pm 1.2^{\text{d}}$  вариаций профиля линии  $\text{SiIV}$  [4].

Фурье-анализ вариаций профилей линий выявил присутствие их регулярных изменений с периодами  $0.72^{\text{d}} \pm 0.03^{\text{d}}$  [4],  $12.3^{\text{h}} \pm 0.5^{\text{h}}$ ,  $6.6^{\text{h}} \pm 0.3^{\text{h}}$  [8]. Вариации профилей линии  $\text{H}\alpha$  с периодами  $4.8^{\text{d}}$ ,  $1.2^{\text{d}}$  и  $0.8^{\text{d}}$  обнаружены в работе [6]. Характерные времена изменений в фиолетовом крыле УФ-линий  $\text{SiIV}$  и  $\text{CIV}$  составляют  $2.5^{\text{d}} \pm 0.8^{\text{d}}$  и  $2.2^{\text{d}} \pm 0.7^{\text{d}}$  соответственно [6] и близки к найденным нами периодам вариаций профилей оптических линий.

Наблюдаемая вращательная модуляция профилей линий связана, по-видимому, с наличием слабого магнитного поля на поверхности O-звезды. К сожалению, относительно низкое качество спектров  $\lambda$ Сер, полученных нами при наблюдениях в БОАО, позволило получить лишь верхние пределы эффективного магнитного поля. Для более точного определения магнитного поля  $\lambda$ Сер мы планируем провести наблюдения на БТА САО РАН с существенно более высоким отношением сигнал/шум.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных наблюдений  $\lambda$ Сер и их последующего анализа можно сделать следующие выводы:

1. Все исследуемые линии имеют переменные профили. Амплитуда переменности составляет 2%–3% от уровня интенсивности континуума.

2. Обнаружена регулярная переменность профилей с частотами в интервале  $(0.3 - 1.6) \pm \pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$  (периодами  $0.6^d - 3.4^d$ ), которая, скорее всего, вызвана вращательной модуляцией профилей линий в спектре звезды.

3. Найдены короткопериодические вариации профилей с частотами  $(2.2 - 6.9) \pm 0.3 \text{ сут}^{-1}$  (периодами  $3.4^h - 11^h$ ), связанные, по-видимому, с нерадиальными пульсациями звезды. Полученные периоды вариаций профилей согласуются с данными, приведенными в других работах.

4. Анализ сглаженных временных вариаций профилей линий в спектре  $\lambda$ Сер выявил слабую переменность линий CIII  $\lambda 4186.90 \text{ \AA}$  и SiIV  $\lambda 4212.407 \text{ \AA}$ , не обнаружимую другими методами.

5. Сделаны оценки величины продольного компонента  $B_l$  магнитного поля  $\lambda$ Сер. Предполагается, что верхний предел продольного компонента магнитного поля  $B_l$  составляет по абсолютной величине 1 кГс.

Авторы выражают благодарность В.Г. Ключковой за помощь в наблюдениях на БТА (САО РАН) в 1997 г. А.Ф. Холтыгин и Н.П. Судник выражают благодарность за поддержку в рамках проекта 6.38.73.2011 Санкт-Петербургского государственного университета. Г.Г. Валявин признателен Министерству науки и техники (MOST) Республики Корея за поддержку грантом M1-0222-00-0005, а также Корейской федерации научно-технических обществ (KOFST) и Корейскому институту астрономии и космических исследований (KASI) за поддержку в рамках программы "Brain Pool program".

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. M. Kahn, M. A. Leutenegger, J. Cottam, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **365**, L312 (2001).
2. N. A. Miller, J. P. Cassinelli, J. J. MacFarlane, *et al.*, *Astrophys. J.* **577**, 951 (2002).
3. L. Kaper, H. F. Henrichs, J. S. Nichols, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **116**, 257 (1996).
4. L. Kaper, H. F. Henrichs, J. S. Nichols, and J. H. Telling, *Astron. and Astrophys.* **344**, 231 (1999).
5. A. Kaufer, O. Stahl, B. Wolf, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **305**, 887 (1996).
6. L. Kaper, H. F. Henrichs, A. W. Fullerton, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **327**, 281 (1997).
7. S. Lépine and A. F. J. Moffat, *Astrophys. J.* **514**, 909 (1999).
8. J. A. de Jong, H. F. Henrichs, S. Schrijvers, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **345**, 172 (1999).
9. J. A. de Jong, H. F. Henrichs, L. Kaper, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **368**, 601 (2001).
10. S. P. Owocki, J. I. Castor, and G. B. Rybicki, *Astrophys. J.* **335**, 914 (1988).
11. J. -F. Donati, G. A. Wade, J. Babel, *et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **326**, 265 (2001).
12. J. -F. Donati, I. D. Howarth, J. -C. Bouret, *et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **365**, L6 (2006).
13. R. S. Schnerr, H. F. Henrichs, C. Neiner, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **483**, 857 (2008).
14. S. Hubrig, M. Schöller, R. S. Schnerr, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **490**, 93 (2008).
15. S. Hubrig, M. Schöller, N. V. Kharchenko, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **528**, 151 (2011).
16. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **394**, 1338 (2009).
17. S. Hubrig, M. Briquet, P. De Cat, *et al.*, *Astron. Nachr.* **330**, 317 (2009).
18. А. Ф. Холтыгин, Д. Н. Манин, А. Е. Сурков, С. Н. Фабрика, *Письма в Астрон. журн.* **29**, 208 (2003).
19. А. Ф. Холтыгин, Г. Галазутдинов, Т. Е. Бурлакова и др., *Астрон. журн.* **83**, 1 (2006).
20. А. Ф. Холтыгин, Т. Е. Бурлакова, С. Н. Фабрика и др., *Астрон. журн.* **83**, 990 (2006).
21. P. S. Conti and S. A. Frost, *Astrophys. J.* **190**, 137 (1974).
22. E. M. Leep and P. S. Conti, *Astrophys. J.* **228**, 224 (1979).
23. D. Ebbets, *Astrophys. J.* **48**, 399 (1982).
24. J. B. Hutchings and A. Sanyal, *Publs Astron. Soc. Pacif.* **88**, 279 (1976).
25. A. W. Fullerton, in: *Rapid Variability of OB-stars: Nature and Diagnostic Value*, Proc. ESO Workshop, Garching bei München, 1990, ed. D. Baade (Garching near Munich: ESO, 1991), p. 3.
26. M. Henrichs, D. Gies, L. Kaper, *et al.*, in: *Rapid Variability of OB-stars: Nature and Diagnostic Value*, Proc. ESO Workshop, Garching bei München, 1990, ed. D. Baade (Garching near Munich: ESO, 1991), p. 199.
27. H. Henrichs, D. Gies, L. Kaper, *et al.*, in: *Proceedings of the International Colloquium (Verhandlungen, Afd. Natuurkunde. Eerste Reeks)*, Amsterdam, 26 February–1 March 1991, eds C. de Jage, H. Nieuwenhuijzen (Amsterdam, North-Holland: Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 1992), p. 40.
28. Н. А. Кудряшова, А. Ф. Холтыгин, *Астрон. журн.* **78**, 333 (2001).
29. J. Kr̄tička and J. Kubát, *Astron. and Astrophys.* **377**, 175 (2001).
30. J. Kr̄tička and J. Kubát, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **394**, 2065 (2009).
31. A. Herrero, J. Puls, and M. R. Villamariz, *Astron. and Astrophys.* **354**, 193 (2000).

32. T. Repolust, J. Puls, and A. Herrero, *Astron. and Astrophys.* **415**, 349 (2004).
33. A. W. Fullerton, D. L. Massa, and R. K. Prinja, *Astrophys. J.* **637**, 1025 (2007).
34. A. Megier, A. Strobel, G. A. Galazutdinov, and J. Krelowski, *Astron. and Astrophys.* **507**, 833 (2009).
35. L. M. Oskinova, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **361**, 679 (2005).
36. *Echelle spectrometer LYNX*, <http://www.sao.ru/hq/ssl/LYNX.html>.
37. K.-M. Kim, B.-H. Jang, I. Han, *et al.*, *J. Korean Astron. Soc.* **35**, 221 (2002).
38. Th. Rivinius, D. Baade, and S. Štefl, *Astron. and Astrophys.* **411**, 229 (2003).
39. A. W. Fullerton, D. R. Gies, and C. T. Bolton, *Astrophys. J.* **103**, 475 (1996).
40. D. H. Roberts, J. Lehar, and J. W. Dreher, *Astron. J.* **93**, 968 (1987).
41. В. В. Витязев, *Анализ неравномерных временных рядов* (С.-Пб.: Изд-во СПбГУ, 2001).
42. А. Ф. Холтыгин, *Астрофизический бюллетень* (2011, в печати).
43. А. А. Короновский, А. Е. Храмов, *Непрерывный инфракрасный анализ и его приложения* (М.: Физматлит, 2003).
44. I. D. Howarth and R. K. Prinja, *Astrophys. and Space Sci.* **237**, 125 (1996).
45. S. V. Marchenko, A. F. Moffat, K. A. van der Hucht, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **331**, 1022 (1998).