

УДК 524.335-56

МИКРОПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ ЗВЕЗДЫ ι Her

© 2006 г. А. Ф. Холтыгин¹, Г. А. Галазутдинов^{2,3},
Т. Е. Бурлакова^{2,4}, Г. Г. Валявин^{2,4}, С. Н. Фабрика², Б.-С. Ли⁴

¹Астрономический институт С.-Петербургского государственного университета,
С.-Петербург, Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Н. Архыз, Россия

³Институт астрономии и космических исследований, Дэйджон, Корея

⁴Бохинсанская астрономическая обсерватория, КунПук, Корея

Поступила в редакцию 07.04.2005 г.; принята в печать 07.09.2005 г.

Представлены результаты поиска и анализа переменности профилей линий в спектре звезды ι Her. Наблюдения выполнены на 1.8-м телескопе Бохинсанской астрономической обсерватории (Южная Корея) в мае–июне 2004 г. Получено 69 спектров звезды с отношением сигнал/шум ≈ 300 и временным разрешением 5–7 мин. Обнаружена переменность профилей 6 линий H β , HeI и SiIII в области центра линии. Амплитуда переменности составляет $\approx(1-2)\%$ в единицах интенсивности соседнего континуума. Найден свидетельств в пользу гипотезы о циклическом характере изменения профилей указанных линий с периодами от $\approx 7^h$ до $\approx 2.9^d$. Сделан вывод, что ι Her относится к группе медленно пульсирующих звезд.

1. ВВЕДЕНИЕ

Переменные звезды верхней части главной последовательности делятся на две большие группы: звезды типа β Ser и медленно пульсирующие В-звезды (SPB), выделенные как отдельная группа переменных звезд в работе [1]. В группу SPB-звезд входят звезды спектральных классов В2–В5, обладающие мультипериодическими фотометрическими вариациями на временных шкалах от нескольких часов до ≈ 2 сут. Обычно эти вариации приписываются g -модам нерадиальных пульсаций (НРП) высокого порядка (см., например, [2]). Особый интерес представляет подгруппа звезд, находящихся на диаграмме Герцшпрунга–Рессела (ГР) в промежуточной области между звездами типа β Ser и SPB-звездами. Предполагается, что звезды в этой подгруппе обладают характеристиками обеих групп звезд.

Одним из наиболее интересных представителей данной подгруппы является яркая звезда ι Her (85 Her, HR 6588, HD 160762, $V = 3.80^m$) спектрального класса В3 IV–V.

За более чем 80-летний период исследования звезды ι Her были найдены нескольких десятков периодов регулярных спектральных и фотометрических вариаций в промежутке от $\approx 1^h$ до 113^d .

Еще в ранней работе [3] в спектре этой звезды были обнаружены изменения профилей линий MgII 4481 Å и HeI 4388 Å с характерным временем 0.14^d . В работах [4, 5] было установлено, что ι Her является спектрально-двойной звездой с орбитальным периодом 113^d и наличием мало-массивного ($M \leq 0.4 M_{\odot}$) спутника.

В работе [6] сообщается об обнаружении вариаций профилей линий с периодами от 10^h до 14^h , которые были приписаны g -модам НРП. Короткопериодические вариации профилей линий слабых линий в спектре ι Her на временных шкалах $\approx 2^h$ были найдены Смитом [7]. Шапелье и др. [8] обнаружили вариации блеска в фильтре V с амплитудой $\approx 0.01^m$ и периодами 0.12^d и 0.14^d . Такие же периоды получены для вариаций лучевых скоростей ι Her, определенных по линиям в области $\lambda\lambda 3850-4750$ Å.

Наиболее полные фотометрические и спектральные исследования двойной системы ι Her были выполнены Шапелье и др. [9]. Были проанализированы фотометрические и спектральные наблюдения авторов за десятилетний период, начиная с 1985 г., фотометрические данные, полученные на спутнике Hipparcos (1990–1993 гг.) [10], а также все опубликованные ранее измерения лучевых

Таблица 1. Параметры системы ι Нег

Параметр	Значение	Ссылка
T_{eff} , К	16500	[11]
M/M_{\odot}	7–8	[6, 9]
$\lg(L/L_{\odot})$	3.26	[9]
$\lg g$	4.0	[11]
$V \sin i$, км/с	≈ 10	[11]
i , град	≈ 90	[6]
P , сут	112.825 ± 0.008	[9]
γ , км/с	-19.9 ± 0.2	[9]

скоростей. Несмотря на весьма большой объем использованных данных, удалось уверенно выделить только один регулярный компонент с частотой $\nu_1 = 0.28671 \text{ сут}^{-1}$. Отмечена возможное присутствие вариаций лучевых скоростей с частотами 0.43, 0.77 и 0.2483 сут^{-1} .

Обнаружение очень большого числа периодов регулярных изменений блеска и лучевых скоростей звезды ι Нег наводит на мысль, что далеко не все из найденных вариаций реальны, а их обнаружение может быть связано как с погрешностями в обработке используемых данных, так и с наложением и интерференцией различных регулярных компонентов. Возможен транзиентный характер вариаций, которые, существуя в одну эпоху наблюдений, исчезают или становятся нерегулярными в другую.

Для лучшего понимания природы звезды ι Нег и выяснения того, какие из частот фотометрических и спектральных вариаций звезды являются реальными, нами выполнены наблюдения ι Нег в мае–июне 2004 г. на 1.8-м телескопе Бохинсанской астрономической обсерватории (ВОАО) в Южной Корее с высоким спектральным и временным разрешением.

Основные сведения о системе ι Нег представлены во 2-м разделе работы. Выполненные наблюдения и описание процедуры редукиции спектрограмм представлены в разделе 3. В разделе 4 описана общая картина изменений профилей линий на разных временных шкалах. Результаты фурье-анализа вариаций профилей линий представлены в разделе 5. В разделе 6 обсуждаются результаты работы и делаются заключения об эволюционном статусе звезды. Некоторые выводы из проведенного нами исследования даны в последнем разделе.

2. ПАРАМЕТРЫ ι Нег

Спектрально-двойная звезда ι Нег состоит из яркой ($V = 3.80^m$) звезды спектрального

класса В3 и слабого маломассивного спутника ($\Delta m = 7.5^m$ [9]). Орбитальный период системы $P = 112.825 \pm 0.008 \text{ сут}$ [9].

Звезда ι Нег на диаграмме ГР находится в промежуточной области между переменными звездами типа β Сер ранних подклассов спектрального класса В и медленно пульсирующими звездами более поздних подклассов (SPB) [1]. Параметры звезды представлены в табл. 1. В таблице T_{eff} — эффективная температура звезды, M — масса главного компонента системы, g — ускорение силы тяжести на поверхности звезды, i — угол наклона оси вращения главного компонента, $V \sin i$ — скорость вращения главного компонента, P — орбитальный период системы, γ — скорость центра масс системы.

Расстояние между главной звездой и маломассивным спутником существенно меньше $1''$. Вклад маломассивного ($\approx 0.4 M_{\odot}$ [9]) спутника в полное излучение системы пренебрежимо мал, поэтому, в дальнейшем, говоря о звезде ι Нег, мы будем иметь в виду главный компонент системы.

3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Спектральные наблюдения системы ι Нег были выполнены в рамках “Программы поиска быстрой переменности профилей линий в спектрах звезд ранних спектральных классов” [12]. Наблюдения проводились в течение трех наблюдательных ночей 25, 29 мая и 2 июня 2004 г. с помощью оптоволоконного эшелле-спектрографа BOES [13] 1.8-м телескопа обсерватории ВОАО, оснащенного ПЗС-приемником (2048×4096 пикс., размер пиксела — $15 \times 15 \text{ мкм}$).

Получено 69 эшелле-спектров со спектральным разрешением $R \approx 44000$ в широкой спектральной области $3782 \text{ \AA} < \lambda < 9803 \text{ \AA}$. Из них в первую ночь была получено 14 спектров за $\approx 2.3^h$, во вторую — 10 спектров (время наблюдений $\approx 1^h$). В третью наблюдательную ночь за $\approx 5.2^h$ было получено 45 спектров. Общее время наблюдения составило около 8.5^h . Звезда является весьма ярким объектом, поэтому при малом времени экспозиции (около 3–7 мин) было достигнуто высокое значение отношения $S/N \approx 300$. Интервал времени между получением последовательных спектров составил 6–10 мин.

Изображения обрабатывались стандартным образом с помощью пакета IRAF. Последующая редукиция спектров проводилась с использованием модифицированной версии 2004 г. (Dech20T) пакета Dech [14]. Для исследования переменности профилей линий спектры нормировались на

континуум, который проводился по следующей автоматизированной схеме: с помощью медианного и других широкополосных фильтров в каждом порядке эшелле-спектра отфильтровывались узкие спектральные детали. Области, содержащие широкие спектральные детали (например, водородные линии) заменялись в каждом порядке интерполированными значениями из соседних порядков, где эти области отсутствовали. Окончательно, полученный таким образом двухмерный спектр, сглаживался с помощью двухмерного скользящего фильтра. Сформированное в результате описанной процедуры изображение представляет собой двухмерный континуум исследуемого спектра. Далее проводилась нормировка каждого индивидуально-го двухмерного ПЗС-спектра на этот континуум.

Используемая методика построения континуума имеет ряд преимуществ перед традиционной. Основным из этих преимуществ является возможность восстановления с высокой точностью физического континуума в области широких спектральных деталей. Например, в области водородных линий $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ и $H\delta$ точность восстановления континуума в нашем исследовании составляет постоянную величину около 1%.

Методика построения континуума тестировались нами в специальном исследовании переменности профилей бальмеровских линий Ar/Vr-звезд [15, 16]. В работах изучались разностные вариации профилей в процессе вращения исследуемых звезд. Точность проведения уровня континуума исследовалась путем сравнения с модельными профилями линий. При использовании той же методики и при примерно таком же, как в настоящей работе, качестве спектрального материала, но с худшим отношением сигнал/шум (≈ 100 в области линии $H\beta$) стандартные отклонения в разностных спектрах в области водородных линий не превышают величину 0.2–0.3%.

Длины волн были переведены стандартным образом в гелиоцентрическую шкалу. В дальнейшем для удобства анализа переменности профилей в качестве нуля-пункта шкалы длин волн было использовано среднее значение лучевой скорости центра масс системы ι Her: $V_{\text{rad}} = -19.9$ км/с [9] (табл. 1).

4. ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

В полученном нами спектре отождествлено свыше 100 линий H, He, C, N, O и других элементов. Для детального анализа мы использовали 6 линий: HeI 4437.551 Å, SiIII 4552.616 Å, SiIII 4567.82 Å, HeI 4713.145, 4713.376 Å, $H\beta$ и HeI 5875.621, 5875.966 Å. Эти линии были отобраны исходя из следующих критериев:

- а) линии являются неблендированными,
- б) остаточные интенсивности в центре линии $r \leq 0.8$.

Входящие в данный список линии HeI и SiIII могут быть эффективно использованы для поиска вариаций профилей, связанных с НРП [17].

4.1. Вариации средних профилей

Для исследования переменности профилей на масштабах дней, все спектры, полученные в каждую из трех наблюдательных ночей, были усреднены. На рис. 1 представлены полученные таким образом средние спектры звезды в области избранных линий HeI, SiIII и $H\beta$.

Из анализа рис. 1 видно, что максимум амплитуды вариаций средних профилей находится вблизи центра исследуемых линий, что, вероятнее всего, связано с малостью значения $V \sin i$ для ι Her. Амплитуда переменности в центре линий составляет 0.5–2% в единицах соседнего с линией континуума.

4.2. Разностные профили.

Поиск переменных деталей

Для выделения переменных деталей профилей линий всех полученных спектров находились разностные профили (индивидуальный профиль линии минус средний). Для иллюстрации вариаций профилей линий на рис. 2 представлены карты плотности разностных профилей исследуемых линий в спектре ι Her, полученные по наблюдениям, выполненным 2 июня 2004 г. Время T (в часах от момента начала наблюдений) отсчитывается снизу вверх.

Заметные на глаз изменения профилей присутствуют только вблизи центра линии, в области скоростей ± 30 км/с. Отсутствие заметных вариаций профилей в области больших скоростей связано, по-видимому, с малой амплитудой изменений профилей в области вне полосы $\pm(V \sin i + W)$, где $W \approx 20$ км/с — ширина слабых линий в спектре звезды на половине максимума интенсивности.

Следует отметить, что для всех разностных профилей линий картина переменности очень близка. В начале наблюдений вблизи центра линии на скорости ≈ -10 км/с видна квази-абсорбционная деталь профиля (выделена черным цветом). С течением времени эта деталь сначала смещается ($T = 0^{\text{h}} - 2^{\text{h}}$) в область отрицательных скоростей (до ≈ -20 км/с), затем в интервале $T = 2^{\text{h}} - 3^{\text{h}}$ часа переходит в область положительных скоростей, достигает максимального положительного отклонения в момент времени $T \approx 4^{\text{h}}$ и на промежутке

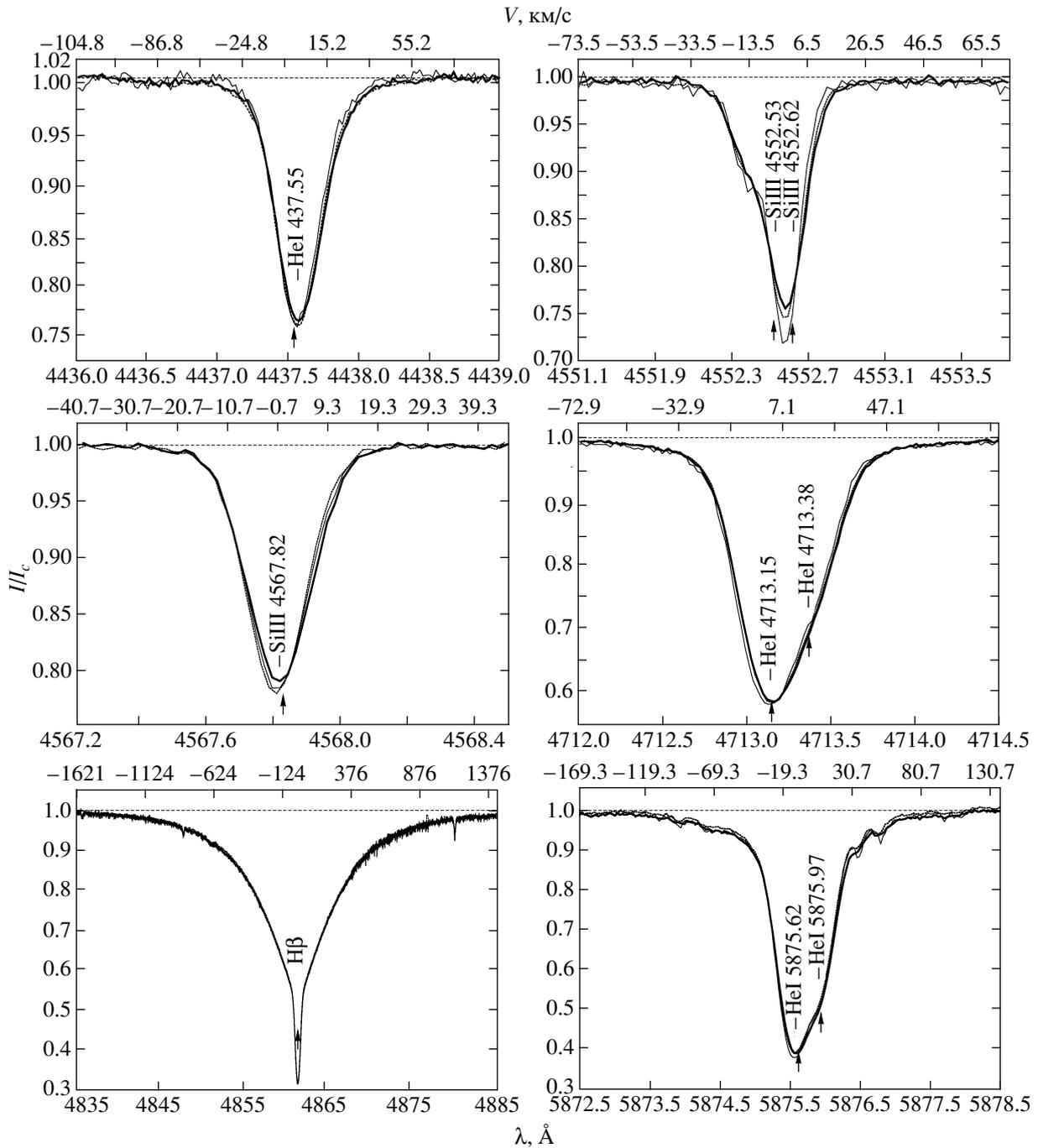


Рис. 1. Средние профили для спектров, полученных в наблюдательные ночи 25 мая (тонкая сплошная линия), 29 мая (пунктирная линия) и 2 июня (жирная сплошная линия) 2004 г. Интенсивности I выражены в долях интенсивности континуума I_c . Вертикальные стрелки отмечают лабораторные длины волн линий.

времени $T = 4^h - 5.2^h$ снова перемещается к центру линии.

Симметрично квази-абсорбциям профиля располагаются квази-эмиссионные детали (выделены белым цветом и оттенками серого). Перемещение квази-эмиссионных деталей во всех исследованных профилях симметрично смещению их квази-

абсорбционных деталей. Такая картина переменности типична для вариаций профилей, вызываемых нерадиальными фотосферными пульсациями (см., например, [18, 19]). Таким образом, можно высказать предположение, что причиной переменности на промежутках времени в нескольких часов являются НРП.

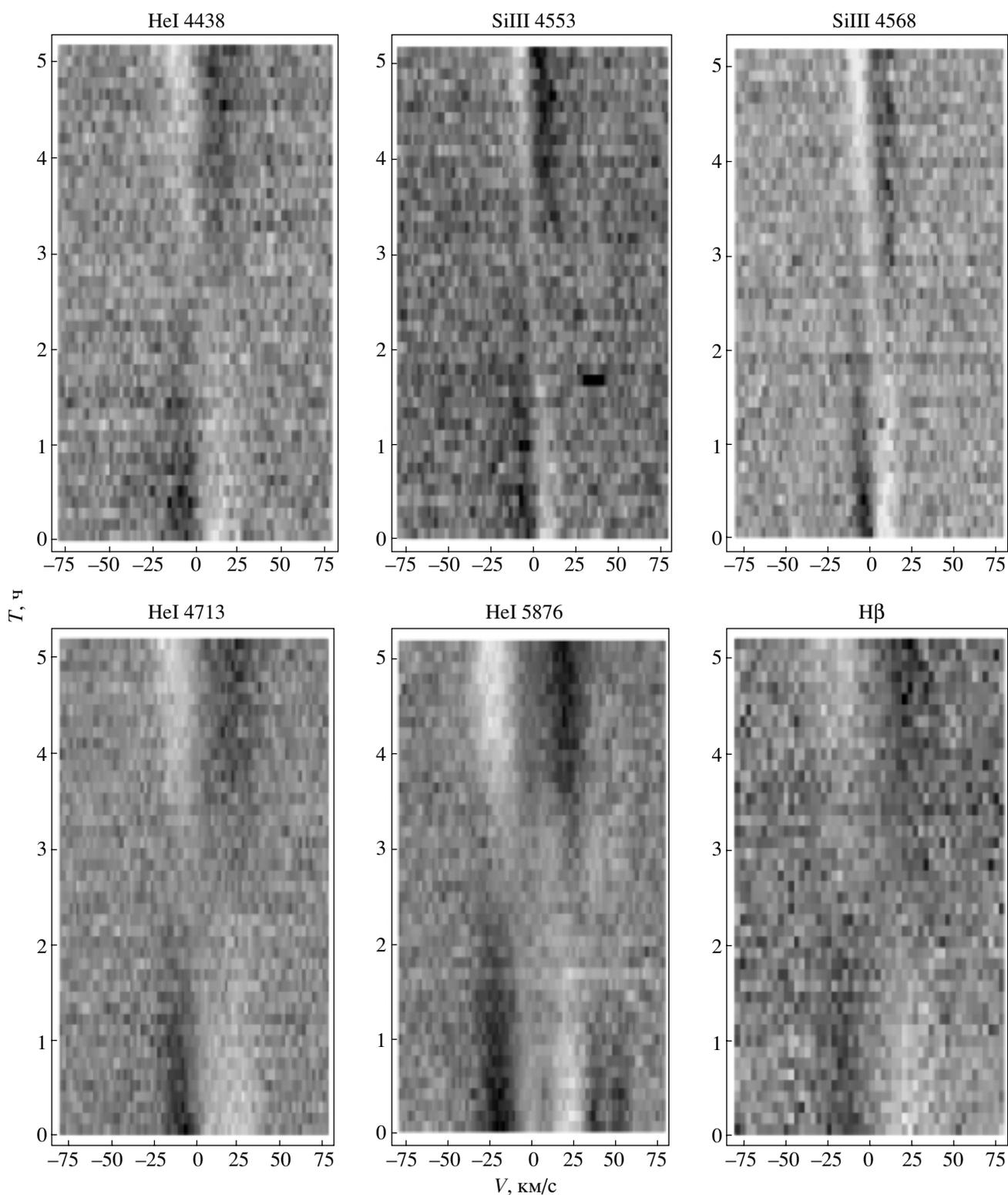


Рис. 2. Динамические спектры вариаций профилей линий в спектре звезды ι Her 2 июня 2004 г. Отклонения индивидуальных профилей линий от среднего показаны оттенками серого цвета. Светлым областям на диаграммах соответствуют участки профилей, лежащие выше уровня среднего профиля, темным — ниже среднего профиля. Интервал между последовательными спектрами — 7 мин. Ось времени направлена снизу вверх.

5. РЕГУЛЯРНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ

5.1. Фурье-анализ вариаций профилей линий

Для выяснения механизма, вызывающего переменность профилей, необходимо выяснить, являются ли изменения профиля в той или иной степени регулярными (циклическими), нерегулярными (стохастическими) или они являются суперпозицией регулярных и нерегулярных изменений. Для детального анализа этих изменений и поиска в них периодических компонентов в данной работе использованы методы фурье-анализа.

Для каждой из изучаемых линий были построены временные ряды величин $\Delta I(t, \lambda)$ — разностных интенсивностей для заданного профиля в момент времени t для значения λ . Значения λ переведены в доплеровские смещения V от центра профиля (в системе отсчета, связанной со звездой). Для каждого из полученных временных рядов рассчитывалась плотность спектра мощности дискретно-преобразования Фурье [20].

Для оценки значений плотности спектра мощности фурье-преобразования рассчитывались значения периодограммы Шустера [21]:

$$D(\nu, V) = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{k=0}^{N-1} \Delta I(t_k, V) e^{-i2\pi\nu t_k} \right|^2. \quad (1)$$

Здесь $\{t_k\}$ — набор временных отсчетов, в которые были произведены измерения анализируемой величины $\Delta I(t_k, V)$

Дискретные спектры мощности Фурье являются сверткой истинного фурье-спектра и спектрального окна, являющегося характеристикой используемой временной сетки [21]. Поэтому в дискретном спектре Фурье появляются ложные пики, что требует использования алгоритмов очистки фурье-спектра. Для этой цели мы использовали алгоритм CLEAN [22] в модифицированном варианте, описанным в работе [23].

Алгоритм CLEAN применялся для временных рядов, построенных по всем возможным значениям V вдоль профиля исследуемых линий в полосе ± 80 км/с. Для сглаживания шумового компонента вариаций профилей значения ΔI усреднялись в спектральном окне с шириной $\sigma = 2-5$ пикс. ($\approx 0.06-0.15$ Å). Оказалось, что выбор различных значений σ в указанном промежутке практически не влияет на результирующие фурье-спектры.

При анализе фурье-спектров особенно важен вопрос об уровнях значимости пиков периодограмм — для того, чтобы выяснить, какой из этих пиков соответствует реальным гармоническим компонентам временных рядов $\Delta I(t, V)$ вариаций

профилей линий. В настоящей работе использовалось соотношение [20, 23] вероятности того, что отсчет нормированной периодограммы белого шума $Z = D(\nu, V)/(\sigma_0^2/N)$ превзойдет значение z :

$$F(z) = P(Z > z) = 1 - (1 - e^{-z})^{1/N_i}, \quad (2)$$

где σ_0^2 — дисперсия отсчетов белого шума, N_i — число независимых отсчетов периодограммы. При задании малой величины $q = F(Z_q) \ll 1$ значение

$$Z_q = -\ln [1 - (1 - q)]^{1/N_i} \approx \ln(N_i/q). \quad (3)$$

При выделении значимых на уровне q пиков периодограмм методом CLEAN нами рассматривались только те пики, высота которых в исходной периодограмме превосходит значение Z_q . Величина Z_q зависит от выбора значения N_i . Для равномерных рядов обычно выбирается $N_i = N/2$ [20]. В работе [24] предлагается использовать для неравномерных рядов эмпирическое соотношение, дающее существенно (в 2–3 раза) большее значение N_i .

Авторы работы [25] указывают на ошибочность результатов статьи [24] и предлагают использовать классическое значение $N_i = N/2$. Отметим, что согласно формуле (3) значение Z_q логарифмически зависит от N_i и при вариации числа N_i в пределах множителя 2–3 изменяет значение Z_q не более чем на 20%. Исходя из высказанных соображений, в дальнейшем при выделении значимых пиков периодограмм вариаций профилей линий мы будем использовать значение $N_i = N/2$. Ввиду сложности и малой изученности статистических свойств периодограмм белого шума для существенно неоднородных рядов [20] мы будем использовать значение $q \leq 10^{-3}$ — меньшее, чем обычно применяемая величина $q \leq 10^{-2}$ — для более надежного выделения значимых пиков периодограмм.

5.2. Фурье-анализ наблюдений, выполненных 2 июня 2004 г.

Процедура фурье-анализа профилей линий и построения периодограмм проводилась в два этапа. На первом этапе были проанализированы наблюдения, выполненные в последний наблюдательный день 2 июня 2004 г. На втором этапе анализировались данные всех наблюдений.

На рис. 3 представлены контурные графики плотности периодограммы Шустера после выполнения процедуры очистки фурье-спектра мощности с использованием алгоритма CLEAN для всех рассматриваемых линий в спектре ι Her, построенные по 45 профилям линий в спектрах, полученных 2 июня 2004 г. за промежуток времени $T_{\text{June 2}} = 5.2^{\text{h}}$.

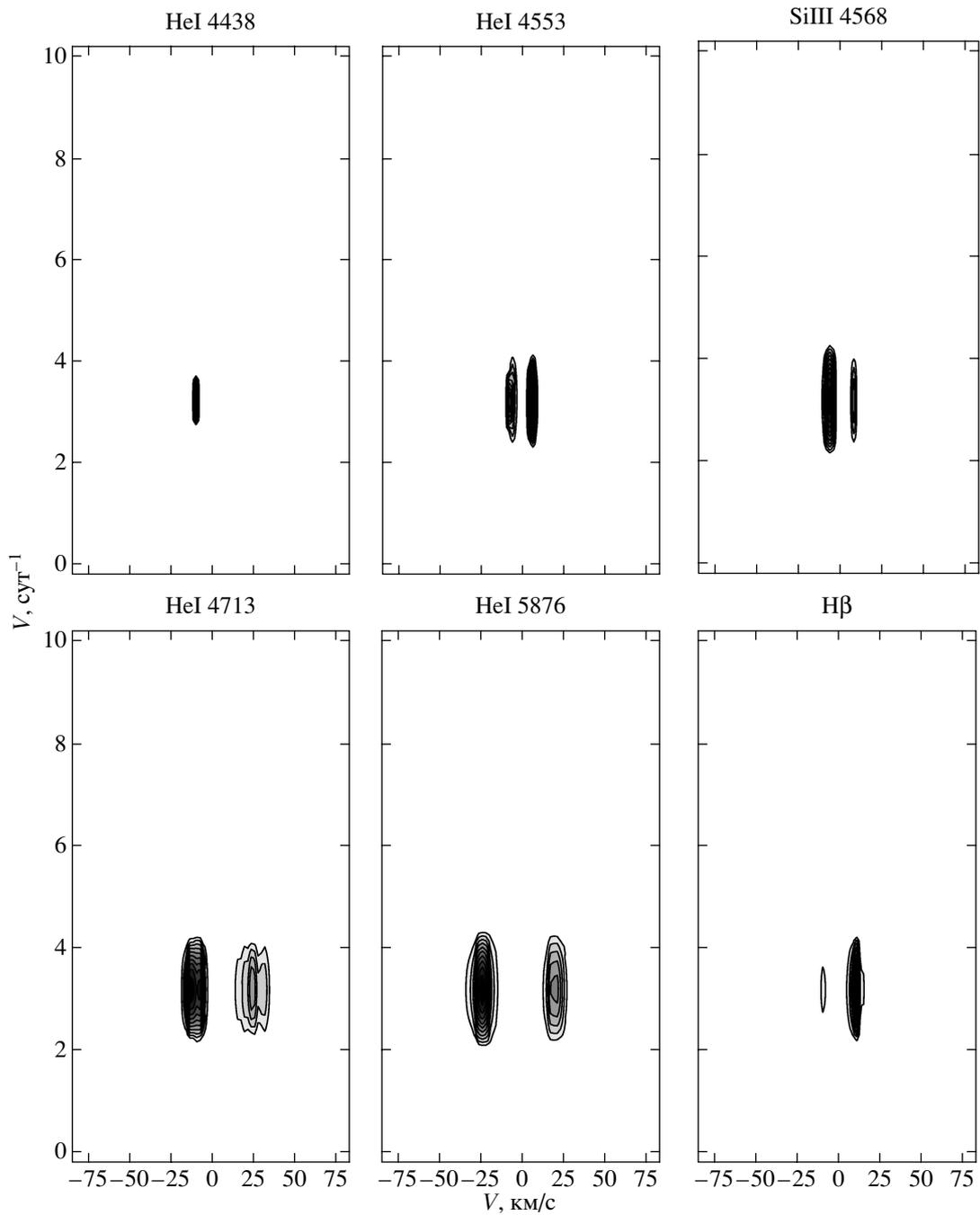


Рис. 3. Фурье-спектры вариаций разностных профилей линий после выполнения процедуры очистки фурье-спектра мощности методом CLEAN в области частот $\nu = 0-10 \text{ сут}^{-1}$ по наблюдениям, выполненным 2 июня 2004 г. Представлены только значения амплитуды фурье-спектров, соответствующие уровню значимости гипотезы о присутствии сильного пика в периодограмме белого шума $q \leq 10^{-7}$. Более темные значения на диаграммах соответствуют большим значениям амплитуды.

При построении контурного графика плотности спектра мощности фурье-преобразования для наглядности отбрасывались все значения периодограммы, соответствующие уровню значимости $q \leq 10^{-7}$ гипотезы о присутствии сильного пика белого шума в периодограмме. Тем самым на

графиках представлены только значимые на этом уровне компоненты периодограммы.

На всех спектрах видно присутствие широкого пика плотности спектра мощности фурье-спектра с частотой $\nu \approx 3.1 \text{ сут}^{-1}$. Отметим, что для всех рассматриваемых линий максимумы периодограмм

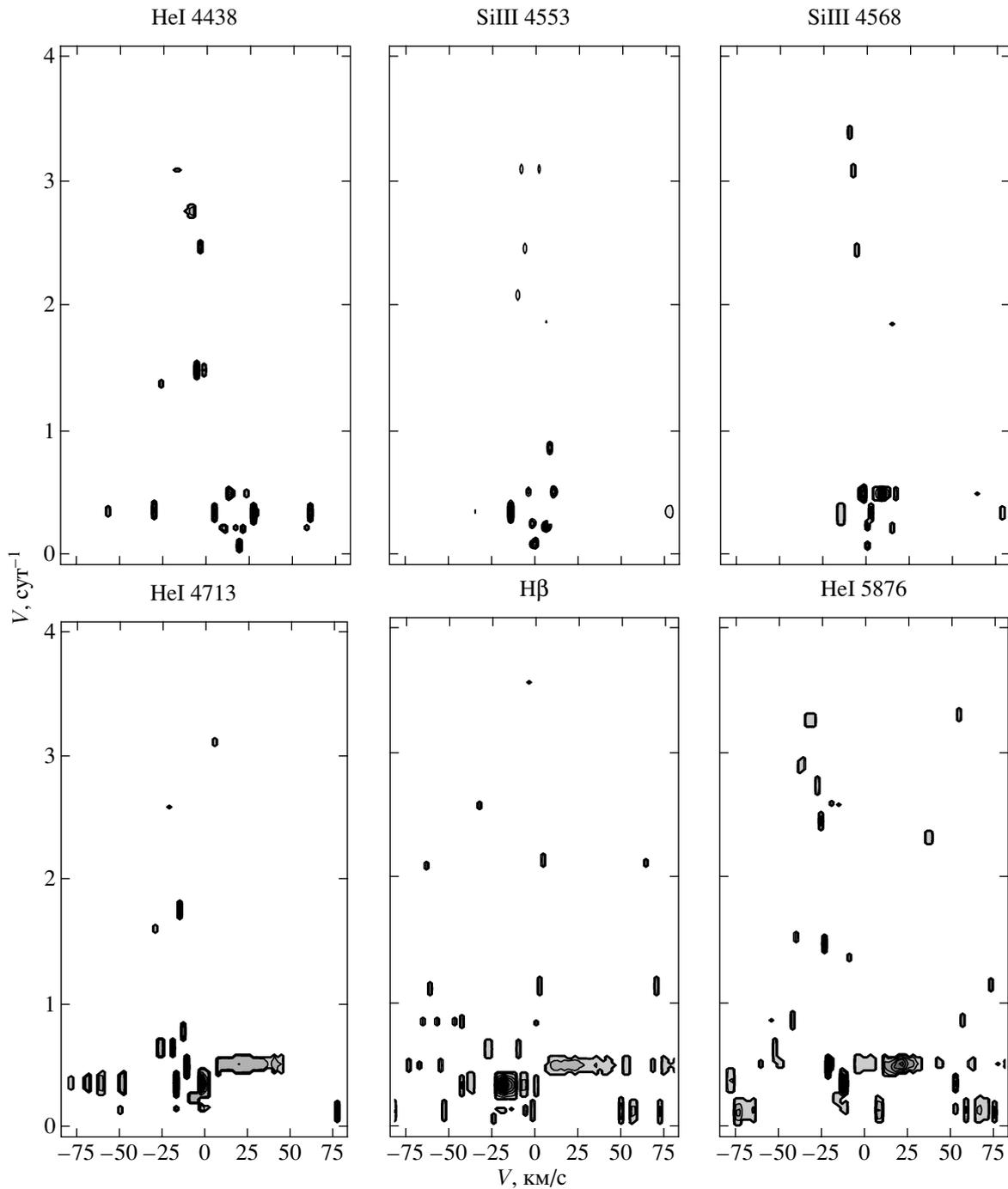


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для всех наблюдений, выполненных 25, 29 мая и 2 июня 2004 г. В отличие от рис. 3, представлены значения амплитуды фурье-спектров, соответствующие уровню $q \leq 10^{-3}$.

совпадают и находятся вблизи полосы $\pm V \sin i$, что является дополнительным свидетельством в пользу предположения о связи вариаций профилей линий в спектре ι Her с НРП.

Величина $T = 1/\nu \approx 7.7$ ч, что больше полного времени наблюдений 2 июня 2004 г. Разрешение фурье-спектра составляет $\approx 1/T_{\text{observ}} \approx$

$\approx 4.6 \text{ сут}^{-1}$ [23], где $T_{\text{observ}} = T_{\text{June 2}}$ — полная продолжительность анализируемых наблюдений, что больше самой величины ν . Таким образом, на основании выполненного нами анализа фурье-спектров вариаций профилей линий в спектрах ι Her, полученных 2 июня 2004 г. нельзя сделать вывод о присутствии периодического компонента вариаций профилей с частотой $\nu \approx 3.1 \text{ сут}^{-1}$. Можно

Таблица 2. Частоты ν и периоды P периодических гармоник вариаций профилей линий в спектре ι Her

№	ν , сут ⁻¹	σ	P	HeI 4438	SiIII 4553	SiIII 4568	HeI 4713	H β	HeI 5876	Статус
1	0.12 \pm 0.14	0.03	8.3 ^d	+	+	+	+	+	+	:
2	0.34 \pm 0.14	0.08	2.9 ^d	+	+	+	+	+	+	+
3	0.49 \pm 0.14	0.12	2.0 ^d	+	+	+	+	+	+	:
4	0.82 \pm 0.14	0.20	1.3 ^d	-	+	-	-	+	+	+
5	1.1 \pm 0.14	0.26	21.8 ^h	-	-	-	+	+	+	+
6	1.45 \pm 0.14	0.35	16.6 ^h	+	-	-	-	-	+	:
7	1.8 \pm 0.14	0.43	13.3 ^h	-	+	+	+	-	-	+
8	2.1 \pm 0.14	0.51	11.4 ^h	-	+	-	-	+	-	:
9	2.4 \pm 0.14	0.58	9.2 ^h	+	+	+	-	-	+	+
10	2.8 \pm 0.14	0.68	8.6 ^h	+	-	-	-	-	+	+
11	3.1 \pm 0.14	0.75	7.7 ^h	+	+	+	+	-	-	+
12	3.4 \pm 0.14	0.82	7.1 ^h	-	-	+	-	+	+	+

Примечание. В третьей колонке σ — безразмерная частота пульсаций (см пункт 6.6.3). Символ “+” в колонке, относящейся к какой-либо конкретной линии, означает, что компонент данной частоты присутствует в периодограмме. Символ “+” в последней колонке означает, что компонент с данной частотой, по-видимому, реален, а символ “:” — что данная гармоника может относиться к ложным пикам периодограммы.

только заключить, что вариации профилей всех исследованных нами линий в спектрах, полученных 2 июня 2004 г., близки к синусоидальным с периодом около 7–8 ч. Для решения вопроса о реальности периодического компонента с $\nu \approx 3.1$ сут⁻¹ необходим анализ всех выполненных нами наблюдений ι Her.

5.3. Фурье-анализ всех наблюдений

Совместно с наблюдениями, выполненными 2 июня 2004 г., мы воспользовались результатами наблюдений, проведенных 25 и 29 мая 2004 г. При построении фурье-спектров вариаций профилей линий использовались разностные профили, полученные вычитанием из индивидуальных профилей линий среднего профиля за все три ночи наблюдений.

Из-за больших пропусков во временных рядах для устранения ложных пиков использовался алгоритм CLEAN. При расчетах использовалось значение уровня значимости $q = 10^{-3}$ гипотезы о присутствии сильного пика белого шума в периодограмме.

В рассчитанных периодограммах присутствует несколько десятков отдельных пиков. Однако только в промежутке частот $\nu = 0-4$ сут⁻¹ найдены значимые на уровне $q = 10^{-3}$ компоненты. Все значимые на данном уровне пики периодограммы

существенно (в 2 и более раз) превосходят величины Z_q , рассчитанные по формуле (3), что является дополнительным подтверждением их реальности.

Периодограммы фурье-спектра мощности вариаций профилей всех исследованных нами линий в указанном интервале представлены на рис. 4. Найденные частоты гармонических компонентов даны в табл. 2. В таблицу включены только те компоненты спектра мощности фурье-преобразования, которые присутствуют в профилях *не менее двух линий*. Погрешности частот в табл. 2 согласно [23, 26] составляют $\approx 1/T_{\text{observ}}$, где $T_{\text{observ}} = 7.24$ сут — полная продолжительность наблюдений.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

6.1. Вариации профилей с периодами $>7^h$

Рассмотрим последовательно найденные нами гармонические компоненты вариаций профилей линий в сравнении с найденными в других работах. Период $P_1 = 8.3$ сут, возможно, связан с периодом вращения звезды. Используя данные табл. 1, оценим верхнюю границу периода вращения звезды $P_{\text{rot}} \leq 2\pi R_*/V \sin i \approx 24$ сут, что не противоречит предположению о связи значения P_1 с периодом вращения. Радиус звезды $R_* \approx 4.7 R_{\odot}$ определен по значениям M и $\lg g$ из табл. 1. Это значение практически совпадает со стандартной величиной $R_* \approx 4.8 R_{\odot}$ [27] для звезд ГП спектрального

класса В3. Значение P_1 больше длительности полного промежутка наблюдений (7.25 сут), поэтому его реальность должна быть подтверждена дополнительными наблюдениями, охватывающими бóльший промежуток времени.

Компонент ν_2 в пределах ошибок определения соответствует главному низкочастотному компоненту $\nu = 0.28671 \text{ сут}^{-1}$, обнаруженному в работе [9]. Компонент ν_3 близок к значению 0.5 сут^{-1} , поэтому он может являться первой гармоникой суточного периода, и для подтверждения его реальности необходимы более длительные наблюдения. Компонент ν_4 в пределах ошибок связан с гармоникой 0.77 сут^{-1} , обнаруженной Шапелье и др. [9] при анализе лучевых скоростей УФ-линий, полученных в работе [28].

Компонент ν_6 на рассчитанных нами периодограммах выделяется только для двух линий. Для подтверждения реальности данного компонента требуются провести спектральные наблюдения ι Her с менее длительными пропусками. Компонент ν_7 выделяется в вариациях профиля линий SiIII 4553 Å, SiIII 4568 Å и HeI 4713 Å. В пределах ошибок он совпадает с компонентом 1.72 сут^{-1} , найденным при анализе лучевых скоростей дублета SiII 4131 Å [29]. Разность частот компонентов ν_8 и ν_7 0.3 сут^{-1} близка к частоте компонента ν_2 , к тому же компонент ν_8 обнаруживается только для двух линий. По этой причине нельзя исключить предположение, что компонент ν_8 является спутником компонента ν_7 .

Частота компонента ν_9 в пределах ошибок совпадает с частотой $\nu = 2.42 \text{ сут}^{-1}$, найденной, как и в случае компонента ν_6 , при анализе лучевых скоростей дублета SiII 4131 Å [29]. Компоненты $\nu_{10}-\nu_{12}$ не были обнаружены в предыдущих исследованиях системы ι Her. Тем не менее, на графике плотности спектра мощности фурье-преобразования они выделяются вполне уверенно (рис. 4), а их положение совпадает с положением широкого пика периодограмм вариаций профилей всех исследованных линий, полученных по наблюдениям 2 июня 2004 г. (рис. 3).

В последнем столбце табл. 2 символом “+” отмечены частоты, которые, по нашему мнению, реально присутствуют в фурье-спектре вариаций профилей линий. Символ “:” указывает на необходимость дополнительной проверки реальности присутствия данной частоты в фурье-спектре.

Таким образом, в результате анализа фурье-спектра вариаций профилей линий в спектре ι Her нами выделено 8 гармонических компонентов в интервале частот $0.3 \text{ сут}^{-1} \leq \nu \leq 3.4 \text{ сут}^{-1}$ с периодами от 7.1^h до 2.9^d . Возможное наличие четырех добавочных компонент фурье-спектра в интервале

$0.12 \text{ сут}^{-1} \leq \nu \leq 2.1 \text{ сут}^{-1}$ нуждается в дополнительном подтверждении.

6.2. Короткопериодические вариации профилей

Во многих исследованиях звезды ι Her были обнаружены фотометрические вариации, а также вариации лучевых скоростей с периодами $P \leq 6^h$, соответствующие частотам $\nu = 4-34 \text{ сут}^{-1}$ [7-9].

Выполненный нами фурье-анализ вариаций профилей показал *отсутствие* значимых (на уровне $q \leq 10^{-2}$) компонент фурье-спектра в данной области частот, как при анализе только наблюдений, полученных 2 июня 2004 г., так и при анализе всех проведенных нами наблюдений ι Her.

Только при использовании значения $q = 0.05$ гипотезы о присутствии сильного пика в периодограмме белого шума удалось выявить слабые компоненты фурье-спектра с частотами $\nu = 5.8, 8.3, 8.6, 8.9$ и 9.8 сут^{-1} . Все найденные фурье-компоненты, за исключением компонента $\nu = 8.9 \text{ сут}^{-1}$, обнаружены только в фурье-спектре какой-то одной линии и вне полосы $\pm(V \sin i + W)$, что позволяет считать их ложными пиками, связанными со случайными выбросами периодограммы шумовой компоненты сигнала.

Компонент 8.9 сут^{-1} выявлен в фурье-спектрах вариаций профилей двух линий HeI 4438 Å и SiII 4553 Å в полосе $\pm V \sin i$ и, возможно, реален, хотя отсутствие этого пика в фурье-спектрах мощности вариаций профилей, построенных по данным только за 2 июня 2004 г., свидетельствует против данного предположения.

Можно сделать вывод, что обнаружение быстрых спектральных или фотометрических вариаций в ряде предшествующих работ связано либо с погрешностью используемых процедур анализа временных рядов, либо с транзитным характером короткопериодических вариаций ι Her. Отметим также, что, указанные выше частоты короткопериодических вариаций профилей не попадают ни в одну из областей пульсационной неустойчивости звезд спектрального класса В3 [2].

Для окончательного решения вопроса о наличии или отсутствии быстрых вариаций профилей в спектре ι Her мы планируем проведение спектральных наблюдений ι Her в течении полных 2-4 последовательных ночей, что позволит существенно уточнить частоты найденных периодических компонент и, возможно, обнаружить пока не найденные гармоники.

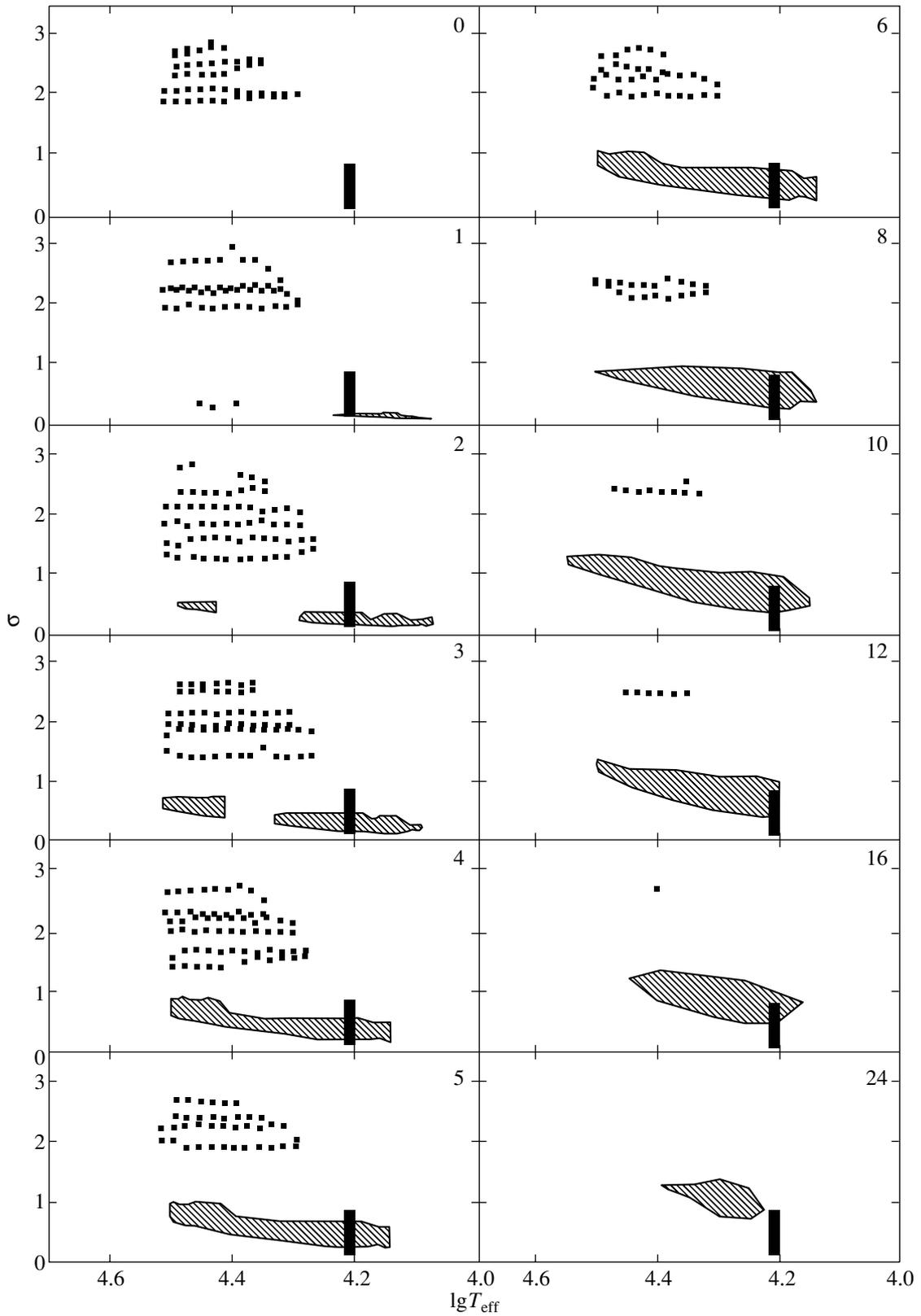


Рис. 5. Положение массива частот вариаций профилей линий в спектре ι Her (черный прямоугольник) на диаграммах $\lg T_{\text{eff}} - \sigma$ для звезд верхней части ГП с болометрическим светимостями, на $0.5^m - 1.0^m$ большими, чем для звезд НГП [32]. Мультипольность пульсационных мод указана в правом верхнем углу каждой диаграммы. Заштрихована область частот пульсаций SPB-звезд. Точки в левом верхнем углу диаграммы — частоты пульсаций звезд типа β Ser.

6.3. Эволюционный статус ι Her

Во многих исследованиях, посвященных ι Her, делается предположение о наличии у звезды спектральных характеристик, характерных как для медленно пульсирующих SPB-звезд, так и для более горячих звезд типа β Ser [6, 7, 29]. Положение ι Her на диаграмме ГР в верхней части области SPB-звезд [30] не противоречит данному предположению.

В то же время результаты выполненного нами анализа показывают, что все обнаруженные частоты вариаций профилей находятся в области частот пульсационной неустойчивости SPB-звезд [30, 31], а характерные для звезд типа β Ser быстропериодические вариации профилей отсутствуют.

Для определения эволюционного статуса ι Her сравним полученные нами частоты регулярной переменности профилей линий в спектре ι Her с результатами расчетов пульсационной неустойчивости звезд верхней части главной последовательности [32]. В данной работе рассчитаны эволюционные треки звезд с массами $1.5 \leq M/M_{\odot} \leq 40$ и нормальным химическим составом ($X = 0.70$, $Z = 0.02$) в интервале возрастов от начальной главной последовательности (НГП) до момента исчерпания водорода в ядре. Для всех этих возрастов были рассчитаны параметры неадиабатических осцилляций звезды в области безразмерных частот $0.05 \leq \sigma \leq 6$, где, согласно [32],

$$\sigma = \frac{\sqrt{\pi\nu}}{\sqrt{G\bar{\rho}}} = 0.067 \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{3/2} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/2}. \quad (4)$$

Здесь G — постоянная тяготения, $\bar{\rho}$ — средняя плотность звезды, R и M — ее масса и радиус, соответственно. Численное значение коэффициента в формуле (4) рассчитано для частот ν в сут $^{-1}$.

Используя выражение (4) и параметры звезды, приведенные в табл. 1, мы вычислили значения безразмерных частот σ для всех найденных частот гармонических компонент вариаций профилей линий в спектре ι Her. Вычисленные значения σ даны в третьем столбце табл. 2. Если исключить из приведенных в данной таблице частот гармонических компонент те, которые являются в той иной мере сомнительными, то найденные нами значения $\sigma \in [0.06-0.85]$.

Звезда ι Her находится на диаграмме ГР близко к полосе звезд на стадии исчерпания водорода в ядре [30], поэтому мы нанесли частоты из данного массива частот на диаграмму $\lg T_{\text{эфф}} - \sigma$ для звезд с болометрическим светимостями, на $0.5^m - 1.0^m$ большими, чем для звезд НГП [32]. Наклонной штриховкой на диаграммах рис. 5 показана область пульсационной неустойчивости SPB-звезд, связанная с высокими g -модами НГП. Точки в

левом верхнем углу диаграмм отмечают безразмерные частоты пульсационной неустойчивости звезд типа β Ser, которые, вероятнее всего, относятся к p -модам.

Цифры в правом верхнем углу диаграмм указывают значения мультипольности пульсационных мод. Из анализа рис. 5 видно, что SPB-звезды устойчивы относительно чисто радиальных колебаний ($l = 0$), а дипольные и квадрупольные колебания ($l = 1, 2$) возможны только в очень узком интервале безразмерных частот $\sigma \approx 0.2$.

Из сравнения положения найденного нами массива частот гармонических компонент вариаций профилей (черный прямоугольник на рис. 5) с областью пульсационной неустойчивости SPB-звезд видно, что значения $l = 4-8$ наиболее вероятны.

Смещение и скорость элемента объема фотосферы со сферическими координатами (θ, ϕ) нерадиально пульсирующей звезды пропорциональны значениям сферической гармоники $Y_{l,m}(\theta, \phi)$ [18]. Для определения мультипольности пульсационных мод l и азимутального параметра m звезд верхней части ГП используются следующие соотношения [19]:

$$l \approx 0.076 + 1.110 \frac{\Delta\Phi_0}{\pi}, \quad (5)$$

$$m \approx -1.028 + 0.613 \frac{\Delta\Phi_1}{\pi},$$

где $\Delta\Phi_0$ — полное изменение фазы Φ_0 исследуемого периодического компонента вариаций профиля линии вдоль профиля линии в полосе $\pm V \sin i$, а $\Delta\Phi_1$ — та же величина для его первой гармоники.

К сожалению, малость значения $V \sin i$ для ι Her не позволила определить точные значения параметров l и m сферических гармоник данным методом. Фаза Φ_0 в полосе $\pm V \sin i$ претерпевает скачок $\Delta\Phi_0$, не меньший, чем 2π , что позволяет сделать вывод о том, что возможные значения $l \geq 2$, в согласии с ранее сделанным выводом о том, что значения $l = 4-8$.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована переменность профилей линий в спектре яркой звезды ι Her спектрального класса V3IV с высоким временным и спектральным разрешением. На основании проведенных наблюдений и их анализа можно сделать следующие выводы:

1. Все исследованные линии с $r_{\text{max}} > 0.2$ имеют переменные профили. Амплитуда переменности составляет 0.5–2% в единицах потока в соседнем с линией континууме.

2. В центральных частях профилей всех исследованных линий в спектре ι Her обнаружены регулярные вариации профилей с частотами в интервале $\nu = 0.3-3.4 \text{ сут}^{-1}$ или с характерными временами $7^{\text{h}}-2.9^{\text{d}}$. Данные вариации могут быть интерпретированы как g -моды нерадиальных пульсаций с мультипольностью $l = 4-8$.

3. Не найдено свидетельств наличия высокочастотных гармоник $\nu \geq 4 \text{ сут}^{-1}$, обнаруженных в предыдущих исследованиях. Сделан вывод о принадлежности ι Her к классу медленно пульсирующих SPB-звезд.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (коды проектов 02-02-17423 и 05-02-16995-а) и грантом Президента РФ по поддержке ведущих научных школ РФ НШ-1088.2003.3. Один из авторов (Г.Г.) признателен фонду Korea MOST за грант M1-0222-00-0005 и программам KOFST и KASI (Brain Pool program) за поддержку данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Waelkens, *Astron. and Astrophys.* **305**, 887 (1991).
2. A. A. Pamyatnykh, *Acta Astron.* **49**, 189 (1999).
3. D. L. Edwards, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **97**, 99 (1937).
4. K. Kodaira, *Publ. Astron. Soc. Japan* **23**, 129 (1971).
5. H. A. Abt and S. G. Levy, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **36**, 241 (1978).
6. M. A. Smith, *Astrophys. J.* **224**, 927 (1978).
7. M. A. Smith, *Astrophys. J.* **246**, 905 (1981).
8. E. Chapellier, J.-M. Le Contel, J.-C. Valtier, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **176**, 255 (1987).
9. E. Chapellier, P. Mathias, J.-M. Le Contel, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **362**, 189 (2000).
10. *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200 (Noordwijk: ESA, 1997).
11. O. I. Pintado and S. I. Adelman, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **264**, 63 (1993).
12. А. Ф. Холтыгин, Д. Н. Монин, А. Е. Сурков, С. Н. Фабрика, *Письма в "Астрон. журн."* **29**, 208 (2003).
13. <http://www.boao.re.kr/BOES/BOESppt3.files/frame.htm>.
14. Г. А. Галазутдинов, *DECH 2.0*, Препринт Специальн. астрофиз. обсерв. № ??? (1996).
15. G. Valyavin, O. Kochukhov, D. Shulyak, *et al.*, *Proc. East Asian Meeting of Astronomy, Korea, 2005* (in press).
16. O. Kochukhov, G. Valyavin, D. Shulyak, *et al.*, ??? (2005, in press).
17. Th. Rivinius, D. Baade, and S. Stefl, *Astron. and Astrophys.* **411**, 229 (2003).
18. J. H. Telting and C. Schrijvers, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **121**, 343 (1997).
19. J. H. Telting and C. Schrijvers, *Astron. and Astrophys.* **317**, 723 (1997).
20. D. S. Scargle, *Astrophys. J.* **263**, 835 (1982).
21. В. В. Витязев, *Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов* (СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001).
22. D. H. Roberts, J. Lehar, and J. W. Dreher, *Astron. J.* **93**, 968 (1987).
23. В. В. Витязев, *Анализ неравномерных временных рядов* (СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001).
24. J. H. Horne and S. L. Baliunas, *Astrophys. J.* **302**, 757 (1986).
25. I. Antokhin, J.-F. Bertrand, R. Lamontange, and A. F. J. Moffat, *Astron. J.* **109**, 817 (1995).
26. V. V. Vityazev, *Astron. and Astrophys. Trans.* **11**, 159 (????).
27. *Allen's Astrophysical Quantities*, 4th ed., ed. A. N. Cox (New York: AIP Press, Springer, 2000).
28. J. B. Rogerson, Jr., *Astron. J.* **89**, 1876 (1984).
29. P. Mathias and C. Waelkens, *Astron. and Astrophys.* **300**, 200 (1995).
30. W. A. Dziembowski, P. Moskalik, and A. A. Pamyatnykh, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **265**, 588 (1995).
31. W. A. Dziembowski, *ASP Conf. Ser.* **78**, 275 (1995).
32. L. A. Balona and W. A. Dziembowski, *Astron. and Astrophys.* **309**, 221 (1999).

MICROVARIABILITY OF LINE PROFILES IN SPECTRUM OF ι Her

A. F. Kholtygin, G. A. Galazutdinov, T. E. Burlakova, G. G. Valyavin,
S. N. Fabrika, and B.-C. Lee

Results of looking for microvariability of the line profiles in the spectra of ι Her and the analysis of the variability are given. The star was observed in the Bohyunsan Optical Astronomy Observatory (BOAO) in May–June 2004. We have obtained the 69 echelle spectra of the star with signal/noise ratio ≈ 300 and time resolution 5–7 min. The microvariability on the level of 1–2% in the continuum units for 6 lines of H I, He I, and Si III was detected. The evidences of the cyclical character of the variability with periods from $\approx 7^{\text{h}}$ to $\approx 3.3^{\text{d}}$ were found. We conclude that ι Her is the slowly pulsating B-star.