

УДК 524.338.5:520.84

## Спектральная переменность IL Цефея

© 2013 Н. З. Исмаилов\*, Г. Р. Бахаддинова, О. В. Халилов, Х. М. Микаилов

Шемахинская астрофизическая обсерватория НАН Азербайджана, Шемаха, AZ 5624 Азербайджан

Поступила в редакцию 8 октября 2012 года; принята в печать 13 марта 2013 года

Приводятся результаты шести лет спектральных исследований IL Сер (HD 216629), звезды типа Ве Хербига. Впервые найдено, что за 2006–2011 гг. различные спектральные параметры эмиссионных линий водорода  $H\alpha$  и  $H\beta$  и абсорбция в линии гелия He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$  показывают медленные изменения со временем; экстремум значений спектральных параметров был достигнут в 2009–2010 гг. Линии D1, D2 NaI в слабом виде повторяют изменение лучевых скоростей в линии  $H\alpha$ . Предполагается, что обнаруженная переменность в спектре звезды может быть связана с присутствием в системе дополнительных тел.

Ключевые слова: звёзды: переменные: Ae/Ве Хербига—двойные—звёзды: индивидуальные: IL Сер

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Звезды типа Ae/Ве Хербига — молодые звезды умеренной массы ( $2\text{--}10 M_{\odot}$ ), находящиеся на стадии эволюции до главной последовательности [1–4]. Эти звезды мы видим, когда впервые после “рождения” звезды начинается ее оптическое излучение. Они являются промежуточным звеном между звездами типа Т Тельца и более массивными звездами. В отличие от звезд типа Т Тельца, у которых фотометрическая и спектральная активность часто объясняется в модели магнитосферной аккреции (МА) (см., например, [5]), у звезд типа Ae/Ве Хербига этот механизм активности не может быть решающим [6–8]. Следовательно, изучение звезд типа Ae/Ве Хербига может пролить свет на проблему образования более массивных звезд, которая к настоящему времени не решена [9].

Звезда HD 216629 = IL Сер ( $\alpha_{2000} = 22^{\text{h}}53^{\text{m}}16^{\text{s}}$ ,  $\delta_{2000} = +62^{\circ}08'45''$ ,  $V \sim 9^{\text{m}}3$ ) известна как член молодой ассоциации Сер OB3, расположенной от нас на расстоянии 735 пк [10]. В работе [10] по результатам измерений шести спектрограмм в области от  $H_{\gamma}$  до  $H_{13}$  была определена скорость вращения звезды, равная 270 км/с. Найден спектральный класс B2 IV–V; лучевая скорость звезды определена как  $V_r = -39.4$  км/с, а по линии межзвездного поглощения Ca II  $V_r = -11.1$  км/с. Объект числится в списке звезд типа Ae/Ве Хербига Финкенцеллера и Мундта [2], где приведена также часть результатов измерений из работы

Асуза и др. [11]. Показано, что в спектре звезды линия  $H\alpha$  имеет однокомпонентную эмиссию, а ее эквивалентная ширина составляет около  $-10 \text{ \AA}$ . В списке Бёма и Каталы [4] приведена скорость вращения  $190 \pm 15$  км/с; эквивалентная ширина эмиссии  $H\alpha$  составляет  $-23 \pm 1 \text{ \AA}$ , а эквивалентная ширина абсорбции He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$  — около  $0.25 \pm 0.05 \text{ \AA}$ .

По фотометрическим наблюдениям Хилл [12] заподозрил периодическую переменность блеска звезды с периодом  $1^{\text{d}}401$ , что, по мнению автора, могло быть вызвано затмениями в двойной системе. Поэтому звезда была включена в ОКПЗ [13] как затменная типа EA. Позже периодичность не была подтверждена, хотя переменность звезды не вызывала сомнений [14]. В работе [15] по эпизодическим спектральным наблюдениям показано, что у этой звезды лучевые скорости по линиям водорода и гелия не показывают значительных изменений. На расстоянии около  $6''$  от звезды в оптическом диапазоне наблюдается визуальный компонент, что затрудняет проведение фотометрических наблюдений высокой точности.

По данным Шевченко и др. [16] измеренная скорость вращения по линиям гелия составляет  $180 \pm 40$  км/с, а эмиссионная линия  $H\alpha$  — раздвоенная. Трудность интерпретации профиля  $H\alpha$  связана с шириной эмиссионных компонент. Из анализа 600 фотометрических измерений Шевченко и др. [16] выявили периодическую переменность блеска звезды с периодом  $50^{\text{d}}9$  и амплитудой  $0^{\text{m}}10$ . Они пришли к заключению, что звезда, вероятно, является затменной двойной системой.

\*E-mail: ismailovn@yahoo.com

Таблица 1. Журнал наблюдений

JD 2450000+	<i>N</i>	$T_{\text{exp, s}}$	JD 2450000+	<i>N</i>	$T_{\text{exp, s}}$
3960.389	2	1500	5078.275	2	3600
3964.328	2	1800	5079.274	2	3600
3966.291	2	1200	5109.368	2	2400
3967.360	2	1800	5120.345	2	2400
4333.293	2	2400	5130.224	2	2400
4683.319	3	1800	5410.341	2	3600
4697.316	3	1200	5412.355	2	3600
4701.356	2	900	5413.347	2	3600
4703.294	4	1200	5417.353	2	3600
4704.399	2	1800	5418.378	2	3600
5021.394	2	2400	5437.245	2	3600
5026.345	2	3600	5439.333	2	3600
5034.428	2	3600	5440.285	2	3600
5048.381	2	3600	5444.383	2	3600
5076.320	2	3600	5517.384	2	3600
5077.320	2	3600	5842.244	3	3600

Из-за небольшой амплитуды первичного затмения этот результат оставался неуверенным. По итогам анализа фотометрических данных авторами звезда внесена в список молодых затменных систем, и эта группа звезд была названа “квазиалголями.”

В работе [17] было установлено существование еще одного, более тесного, оптического компонента звезды на угловом расстоянии  $0''.4$  при позиционном угле  $54^\circ 3'$  и с разницей блеска  $\Delta B = 3^m.5$ . Несмотря на то, что звезда является одним из относительно ярких представителей звезд типа Ae/Be Хербига, к настоящему времени она изучена относительно слабо. Целью настоящей работы является детальное исследование оптического спектра звезды IL Сер.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектральные наблюдения были выполнены в 2006–2011 гг. в кассегреновском фокусе 2-м телескопа ШАО НАН Азербайджана. Применялся спектрометр, собранный на базе спектрографа UAGS [18, 19]. Для данного спектрометра была использована камера Шмидта-Кассегрена с внешним фокусом  $f = 150$  мм и диаметром

зеркала 105 мм. Диаметр коллимированного пучка составляет 75 мм. Плоское зеркало направляет пучок на кросс-диспергирующий элемент. В качестве такового была использована дифракционная решетка 325.5 штр./мм. Это дифракционная решетка, с помощью которой пучок направляется на поверхность основной эшелле-решетки. Для получения спектров плоского поля и спектра сравнения применяется передвижная призма.

В фокальной плоскости камеры крепится светоприемник с ПЗС-матрицей. Матрица  $530 \times 580$  px имеет линейный размер  $9.5 \times 13.9$  мм. Размер одного пикселя  $18 \times 24$  мкм. Дисперсия в красной части составляет  $10.5 \text{ \AA}/\text{мм}$ , а в синей части — около  $6 \text{ \AA}/\text{мм}$ . Всю наблюдаемую область спектра можно охватить двумя кадрами. Спектрометр работает в 70–140 порядках. В красной части на окно ПЗС попадают 28 порядков, а в синей части — 50 порядков. Нормальная ширина щели спектрометра, определяемая размерами пикселей матрицы, составляет 0.35 мм, что при эквивалентном фокусном расстоянии фокуса Кассегрена 29 500 мм соответствует  $2''.4$ .

Основным диспергирующим элементом является эшелле-решетка 37.5 штр./мм, с углом блеска  $63^\circ 5'$ , размер решетки  $200 \times 100$  мм. Решетка работает в автоколлимационном режиме и установлена под углом  $26^\circ 5'$  к вертикальной плоскости. Для сбора монохроматических лучей в фокальной плоскости камеры решетка повернута вокруг своей оси на  $4^\circ$ . Такой поворот позволяет сдвинуть центральные длины волн порядков. При этом изображения щели получаются неперпендикулярными к направлению дисперсии, что приводит к потерям в разрешающей силе спектрометра. Так как у классического спектрографа UAGS основной диспергирующий элемент спектрометра располагается перпендикулярно направлению диспергирующего элемента, возникает необходимость развернуть щель спектрометра на угол  $90^\circ$ , а чтобы устранить неперпендикулярность спектральных линий относительно дисперсии, вызванную поворотом эшелле-решетки на  $4^\circ$ , щель разворачивается еще на  $15^\circ$ .

Спектральное разрешение  $R = 14000$ , отношение сигнала к шуму  $S/N = 80\text{--}100$  в области линии  $H\alpha$ , и  $S/N = 5\text{--}10$  в области линии  $H\beta$ . Для контроля стабильности системы в каждую ночь наблюдений в начале и в конце экспозиции объекта получены спектры стандартных звезд, изображение плоского поля и спектр сравнения. Для привязки к шкале длин волн был использован спектр рассеянного в земной атмосфере света Солнца. Вся обработка изображений и дальнейшее измерение спектрограмм выполнялись с использованием программы DECH20T и ее приложений, разработанных в CAO РАН [20].

По отобранным линиям спектра стандартных звезд и спектра дневного света регулярно измерялись все спектральные параметры отобранных из разных порядков спектральных линий. Специальные систематические измерения избранных линий показывают, что полуширины наиболее чистых атмосферных линий дают хорошую стабильность в пределах стандартного отклонения  $\pm 0.04 \text{ \AA}$ . Оценка инструментального контура была проведена по линиям спектра сравнения (лампа ThAr) в синей и красной части, получены значения  $0.36$  и  $0.44 \text{ \AA}$  соответственно. Значения полуширин отдельных линий в наших измерениях значительно превосходят ширину инструментального профиля: у  $H\alpha$  это  $6\text{--}8 \text{ \AA}$ , у  $H\beta$  —  $2\text{--}4 \text{ \AA}$ , у  $\text{He I } \lambda 5876 \text{ \AA}$  —  $4\text{--}7 \text{ \AA}$ , у  $\text{Na I D1, D2}$  —  $0.8\text{--}1 \text{ \AA}$ , а у  $\text{DIB } \lambda\lambda 5780, 5798 \text{ \AA}$  —  $1.5\text{--}2.0 \text{ \AA}$ .

Измерения лучевых скоростей звезд стандартов выполнялись регулярно в каждую ночь наблюдений. Серия наблюдений звезды стандарта, выполненная в течение одной ночи при разных положениях телескопа, показала, что максимальное отклонение смещений отдельных спектральных линий не превосходит ошибку измерений. Контрольные измерения лучевых скоростей звезд-стандартов в разные ночи также показывают хорошую стабильность в пределах ошибок.

Журнал наблюдений приводится в Таблице 1. Всего было получено 32 пары спектрограмм звезды за шесть лет наблюдений. Каждая пара состоит из двух одинаковых спектрограмм, полученных одна за другой. В некоторые ночи были получены 3–4 одинаковых спектрограммы звезды. В Таблице 1 юлианские даты приведены к середине времени экспозиции усредненных спектрограмм. В последнем столбце приведено среднее время экспозиции для каждой спектрограммы. Нами были измерены эквивалентные ширины  $W_\lambda$ , полуширины FWHM, центральные глубины, определенные как  $R_\lambda = 1 - r_\lambda$ , где  $r_\lambda = I/I_0$  — центральная остаточная интенсивность, и гелиоцентрические лучевые скорости  $V_r$  по линиям водорода  $H\alpha$  и  $H\beta$ , дублету  $\text{Na I D1, D2}$ , линии  $\text{He I } \lambda 5876 \text{ \AA}$ , а также по межзвездным диффузным полосам  $\text{DIB } \lambda\lambda 5780, 5797 \text{ \AA}$ . Ошибки измерений эквивалентных ширин составили около 5%, а измерений интенсивности — около 1%. Ошибка в позиционных измерениях по спектрам звезд-стандартов составила 2–3 км/с. Ошибки измерений эквивалентных ширин эмиссии  $H\beta_1, H\beta_2$  и абсорбции  $\text{He I } \lambda 5876 \text{ \AA}$  иногда превышают этот предел из-за более низкого отношения  $S/N$  в этих участках спектра. Общее представление об измеренных участках спектра дает Рис. 1.

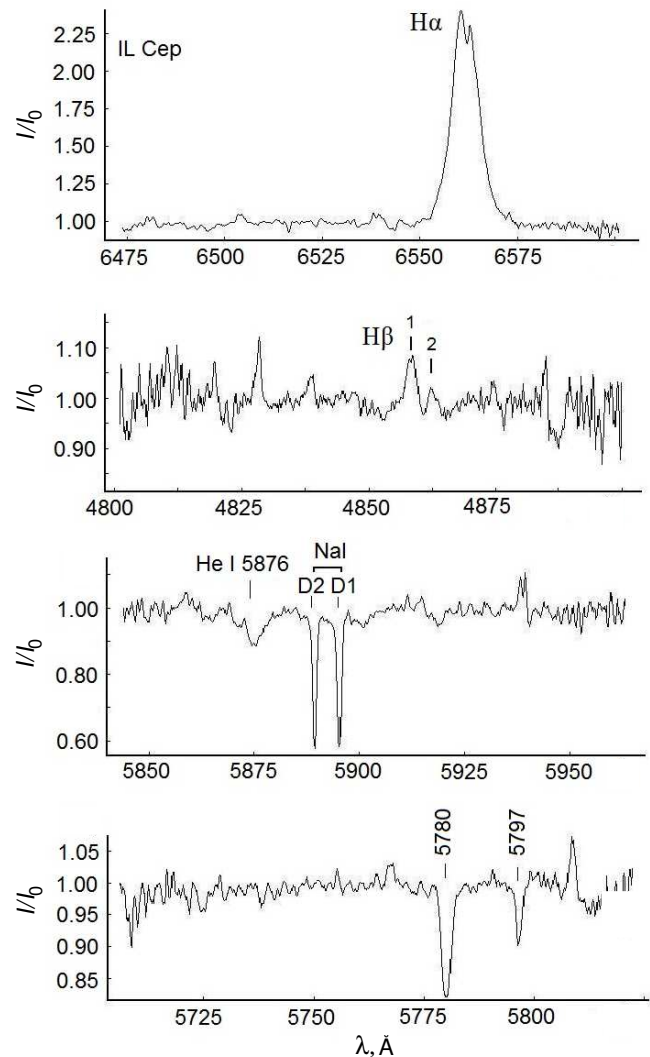


Рис. 1. Отдельные фрагменты спектра ИЛ Цеп (JD 2455444.383). Сверху вниз: линии  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $\text{He I}$  и  $\text{DIB } \lambda\lambda 5780, 5798 \text{ \AA}$ .

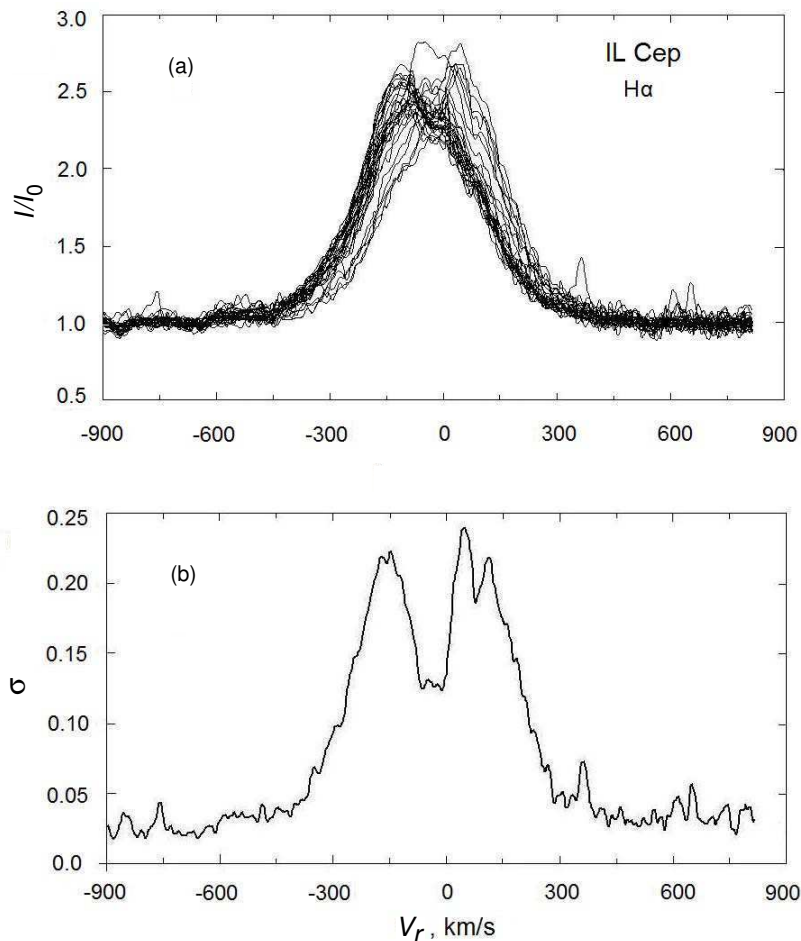
Часть результатов измерений спектральных параметров  $W_\lambda$  и  $V_r$  для всех измеренных линий приведена, соответственно, в Таблицах 2 и 3. В Таблице 2 пустые ячейки означают, что не удалось определить эквивалентные ширины эмиссионных компонентов линии  $H\beta$  из-за того, что пики эмиссии наблюдаются ниже континуума на крыле абсорбции. В последней строке Таблицы 2 приведены средние значения и их стандартные среднеквадратические отклонения. Стандартное отклонение для эквивалентных ширин отдельных линий составляет:  $H\alpha$  — 10%,  $\text{He I}$  — 40%,  $\text{Na I D1, D2}$  — 10–20%,  $\text{DIB } \lambda\lambda 5780, 5797 \text{ \AA}$  — 16–25%,  $H\beta$  — 50%. В то же время уровень  $3\sigma$  для каждой

Таблица 2. Эквивалентные ширины  $W_\lambda$  (Å) спектральных линий IL Cep

JD 2450000+	H $\alpha$	He I $\lambda$ 5876 Å	Na I D1	Na I D2	DIB $\lambda$ 5780 Å	DIB $\lambda$ 5797 Å	H $\beta_1$	H $\beta_2$
3960.389	-13.50	0.51	0.48	0.53	0.43	0.26	-0.28	-0.06
3964.328	-12.40	0.99	0.52	0.52	0.60	0.17	-0.29	-0.08
3966.291	-11.52	0.56	0.43	0.44	0.47	0.24	-0.22	-0.06
3967.360	-12.00	0.58	0.47	0.49	0.56	0.26	-0.12	-0.16
4333.293	-12.49	0.63	0.48	0.53	0.62	0.14	-0.08	-0.11
4683.319	-11.37	0.39	0.44	0.45	0.51	0.10	-0.10	-0.06
4697.316	-12.60	0.60	0.56	0.53	0.62	0.14	-0.23	-0.01
4701.356	-13.40	0.51	0.45	0.46	0.57	0.10	-0.17	-0.06
4703.294	-15.00	0.25	0.43	0.54	0.53	0.15	-0.12	-0.13
4704.399	-13.87	0.44	0.60	0.60	0.55	0.16	-	-
5021.394	-12.98	0.39	0.72	0.64	0.70	0.21	-0.82:	-0.09
5026.345	-11.13	0.49	0.54	0.56	0.58	0.18	-0.25	-0.06
5034.428	-10.89	0.41	0.57	0.56	0.54	0.19	-0.09	-
5048.381	-11.57	0.78	0.61	0.60	0.68	0.22	-0.05	-0.01
5076.320	-10.77	0.64	0.69	0.63	0.64	0.22	-0.20	-0.06
5077.320	-11.96	0.28	0.65	0.58	0.62	0.14	-	-
5078.275	-11.06	0.38	0.54	0.56	0.73	0.14	-	-
5079.274	-9.96	0.48	0.56	0.53	0.54	0.21	-0.16	-
5109.368	-11.46	0.55	0.52	0.53	0.80	0.14	-0.18	-0.06
5120.345	-13.07	0.98	0.49	0.54	0.48	0.18	-0.17	-0.03
5130.224	-12.75	0.75	0.55	0.54	0.51	0.14	-0.20	-0.04
5410.341	-13.40	0.50	0.54	0.58	0.59	0.22	-0.16	-0.06
5412.355	-13.15	0.42	0.58	0.52	0.60	0.20	-0.29	-0.04
5413.347	-12.70	0.49	0.54	0.55	0.46	0.17	-0.14	-0.12
5417.353	-13.50	0.67	0.50	0.50	0.38	0.19	-0.24	-0.13
5418.378	-12.40	0.64	0.60	0.57	0.41	0.16	-0.26	-0.05
5437.245	-13.30	0.52	0.55	0.56	0.56	0.20	-0.26	-0.06
5439.333	-13.85	0.47	0.50	0.52	0.56	0.11	-0.32	-0.05
5440.285	-11.46	0.61	0.61	0.46	0.48	0.22	-0.14	-0.13
5444.383	-13.06	0.75	0.49	0.54	0.54	0.19	-0.19	-0.05
5517.384	-12.30	0.50	0.50	0.50	0.60	0.20	-0.20	-0.10
5842.244	-1.30	0.20	0.10	0.00	0.10	0.00	-0.10	-0.05
Среднее	$-12.3 \pm 1.3$	$0.5 \pm 0.2$	$0.5 \pm 0.1$	$0.5 \pm 0.05$	$0.6 \pm 0.1$	$0.2 \pm 0.05$	$-0.2 \pm 0.1$	$-0.1 \pm 0.05$

Таблица 3. Гелиоцентрические лучевые скорости  $V_r$  (км/с) по отдельным спектральным линиям

JD 2450000+	H $\alpha$	He I $\lambda$ 5876 Å	Na I D1	Na I D2	DIB $\lambda$ 5780 Å	DIB $\lambda$ 5797 Å	H $\beta_1$	H $\beta_2$
3960.389	10.6	-15.5	-6.2	-7.2	-12.7	-11.9	-166	43
3964.328	9.8	-16.0	-7.3	-7.8	-10.3	-8.8	-121	49
3966.291	9.3	-17.0	-7.7	-7.8	-9.8	-10.2	-110	34
3967.360	9.8	-16.1	-7.4	-8.5	-10.4	-11.8	-176	56
4333.293	-6.8	-19.5	-9.4	-11.0	-11.7	-11.4	-124	50
4683.274	-26.6	-20.1	-11.8	-12.4	-10.2	-11.7	-77	71
4697.316	-25.9	-21.0	-9.3	-10.5	-10.8	-9.5	-165	68
4701.356	-26.4	-21.0	-10.7	-11.2	-11.1	-11.1	-167	43
4703.294	-24.4	-17.7	-9.7	-10.8	-9.8	-10.4	-142	71
4704.399	-24.1	-20.6	-10.4	-10.6	-10.0	-8.4	-132	42
5021.394	-52.7	-21.5	-13.5	-13.0	-12.2	-11.3	-	-
5026.345	-50.5	-17.3	-13.4	-12.5	-11.8	-11.7	-163	41
5034.428	-52.5	-18.8	-12.2	-12.1	-12.1	-12.2	-109	98
5048.381	-51.2	-19.8	-12.8	-11.2	-11.9	-10.1	-208	9
5076.320	-51.3	-19.0	-14.3	-13.9	-13.1	-14.0	-174	57
5077.320	-50.3	-18.1	-13.4	-12.3	-13.0	-13.6	-170	23
5078.275	-52.3	-22.3	-14.5	-13.8	-13.8	-13.4	-183	56
5079.274	-50.7	-18.3	-13.4	-13.9	-12.7	-13.8	-169	82
5109.368	-50.0	-18.6	-12.2	-13.0	-12.8	-13.8	-194	12
5120.345	-51.1	-18.6	-13.7	-13.3	-13.0	-13.1	-183	13
5130.224	-50.7	-17.2	-10.9	-11.5	-12.5	-12.5	-182	-7
5410.341	-49.3	-22.8	-10.6	-9.9	-10.1	-11.8	-165	68
5412.355	-54.5	-18.4	-13.0	-12.7	-10.2	-12.1	-154	76
5413.347	-56.3	-17.9	-12.0	-11.6	-11.7	-10.6	-170	71
5417.353	-50.3	-22.9	-14.6	-13.3	-11.6	-11.9	-169	54
5418.378	-53.8	-22.3	-12.4	-13.2	-10.2	-11.1	-147	95
5437.245	-51.1	-18.1	-14.2	-13.6	-12.3	-13.4	-179	63
5439.333	-48.3	-17.4	-11.3	-11.5	-10.3	-10.5	-193	56
5440.285	-56.5	-22.1	-14.0	-13.5	-11.1	-11.4	-163	82
5444.383	-55.7	-19.2	-11.7	-12.6	-10.9	-10.6	-139	80
5517.384	-55.2	-22.0	-10.7	-12.2	-13.2	-12.5	-179	49
5842.244	-41.4	-17.0	-10.7	-11.6	-12.4	-12.8	-179	49
Средняя	$-38.4 \pm 22.2$	$-19.2 \pm 2.1$	$-11.5 \pm 2.3$	$-11.7 \pm 1.8$	$-11.5 \pm 1.2$	$-11.7 \pm 1.4$	$-160 \pm 28.7$	$53 \pm 25.1$



**Рис. 2.** (а) Переменность профиля линии  $H\alpha$ . (б) Среднеквадратичное стандартное отклонение  $\sigma$  относительной интенсивности  $I/I_0$  по длине волны.

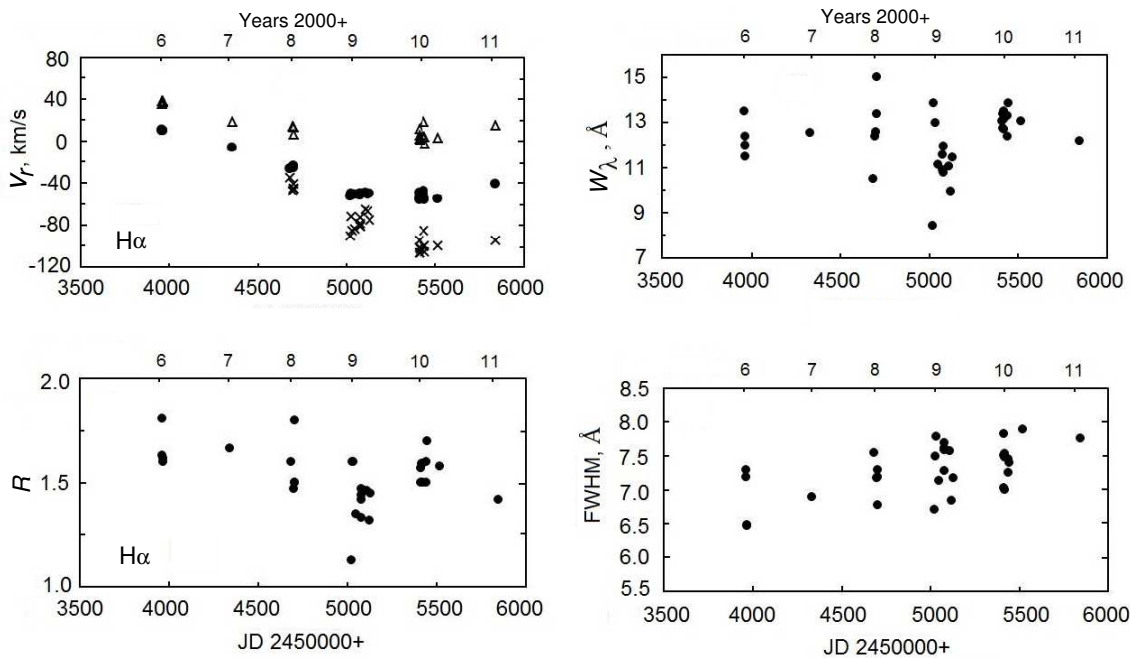
линии должен быть не более 15%. Как видно, по отдельным линиям измеренные стандартные отклонения превосходит этот уровень, что говорит о реальности наблюдаемых изменений.

В Таблице 3 приведены гелиоцентрические лучевые скорости для отдельных спектральных линий. Как видно из последней строки Таблицы 3, где приводятся среднее значение и стандартное отклонение от среднего  $V_r$ , измеренные отклонения у линий водорода значительно превосходят уровень 15% ( $3\sigma$ ).

### 2.1. Линия $H\alpha$

В спектре звезды линия  $H\alpha$  наблюдается в эмиссии, часто с одним доминирующим пиком. Однако, судя по асимметричной структуре профиля, эмиссия состоит из двух пиков, переменных по интенсивности. Иногда эти компоненты видны разделенными, как, например, в спектре JD 2455444.383 (Рис. 1). Профиль линии имеет асимметричный вид и показывает переменность

структуры от ночи к ночи. В разные даты общая ширина линии на уровне континуума составляет 20–22 Å. При вычислении эквивалентной ширины эмиссии измерения производились по всему профилю, т.е. не выделяя отдельных пиков. Среднее значение эквивалентной ширины эмиссии по всем наблюдениям составило  $-12.25 \pm 1.28$  Å. Это значение эквивалентной ширины эмиссии  $H\alpha$  удовлетворительно согласуется со значением  $-10$  Å, полученным в [2], но гораздо меньше значения  $-23$  Å, полученного в работе [4]. Такое различие результатов с данными [4] связано с тем, что авторы приводят эквивалентную ширину избыточного излучения относительно профиля линии стандартной звезды того же спектрального класса. Лучевые скорости в линии  $H\alpha$  были измерены по совмещению крыльев на уровне полуширины основного и инверсного профиля. Также были измерены смещения одиночного пика эмиссии, а также смещения отдельных пиков, когда пики синих и красных компонент эмиссии выделялись. На Рис. 2а приведены



**Рис. 3.** Слева: изменение лучевой скорости (вверху) и модуля эквивалентной ширины (внизу); справа: изменение интенсивности (вверху) и полуширины эмиссии  $H\alpha$  (внизу). Крестиками обозначено смещение синего пика  $V_r(H\alpha_1)$ , треугольниками — красного пика  $V_r(H\alpha_2)$ . Темные кружки соответствуют смещению центра профиля линии  $H\alpha$  на уровне полуширины. На верхней части диаграмм приведена шкала времени в годах.

наложенные друг на друга профили линий  $H\alpha$ , полученные по всем спектрограммам. Из рисунка видно, что, в то время как на уровне крыльев у профиля значительных изменений не наблюдается, пик линии показывает переменность смещения в разные годы. Максимальное значение смещения по всем спектрограммам достигает примерно  $4 \text{ \AA}$ , что соответствует изменению скорости до  $200 \text{ км/с}$ . Заметим, что вершины профилей  $H\alpha$ , полученные до 2009 г., показывают красное смещение, а профили, полученные позже, — синее. Поэтому наложенные друг на друга профили линии  $H\alpha$ , приведенные на Рис. 2а, создают среднюю двухпиковую структуру. Это также хорошо видно при вычислении среднеквадратичного стандартного отклонения относительной интенсивности в каждой длине волны (Рис. 2б).

На левой верхней панели Рис. 3 приводится график изменения со временем величины сдвига центра линии  $H\alpha$  на уровне полуширины (черные кружки), а также сдвиги красного (треугольники) и синего пиков (крестики). Как видно из Рис. 3, гелиоцентрические лучевые скорости линии и отдельных пиков эмиссии показывают монотонное уменьшение от  $+10 \text{ км/с}$  в 2006 г. до  $-55 \text{ км/с}$  в 2010 г. При выделении каждого пика оба компонента показывают синхронное смещение с центром линии. Максимальное смещение синего компонента  $-106 \text{ км/с}$  наблюдается в 2010 г. В

это же время наблюдается максимальный сдвиг и у красного компонента, достигающий  $+1 \text{ км/с}$ . Общий интервал изменений лучевых скоростей в линии  $H\alpha$  составляет около  $60\text{--}70 \text{ км/с}$ . На левой нижней панели Рис. 3 показана переменность эквивалентных ширин со временем. Эквивалентная ширина линии была вычислена интегрированием по всему профилю линии без разделения отдельных компонентов. Как видно, значения эквивалентных ширин эмиссии  $H\alpha$  дают разброс около среднего, немного превышающий уровень  $3\sigma$ . В целом, изменение эквивалентных ширин не показывает синхронность с лучевыми скоростями.

На правой верхней панели Рис. 3 приведено временное изменение центральной интенсивности сильнее компонента эмиссии  $H\alpha$ . Так как разделение профиля линии  $H\alpha$  на отдельные компоненты носит неустойчивый характер, мы здесь использовали интенсивности сильнее компонента эмиссии  $H\alpha$ . Как видно из рисунка, центральные интенсивности  $R$  сильнее компонента эмиссии  $H\alpha$  меняются синхронно с лучевыми скоростями, интенсивность сохраняет тенденцию монотонного уменьшения. В то же время полуширины линий показывают определенное монотонное увеличение (правая нижняя панель Рис. 3).

## 2.2. Линия $H\beta$

Два эмиссионных компонента линии  $H\beta$  практически всегда разделены, и каждый накладывает



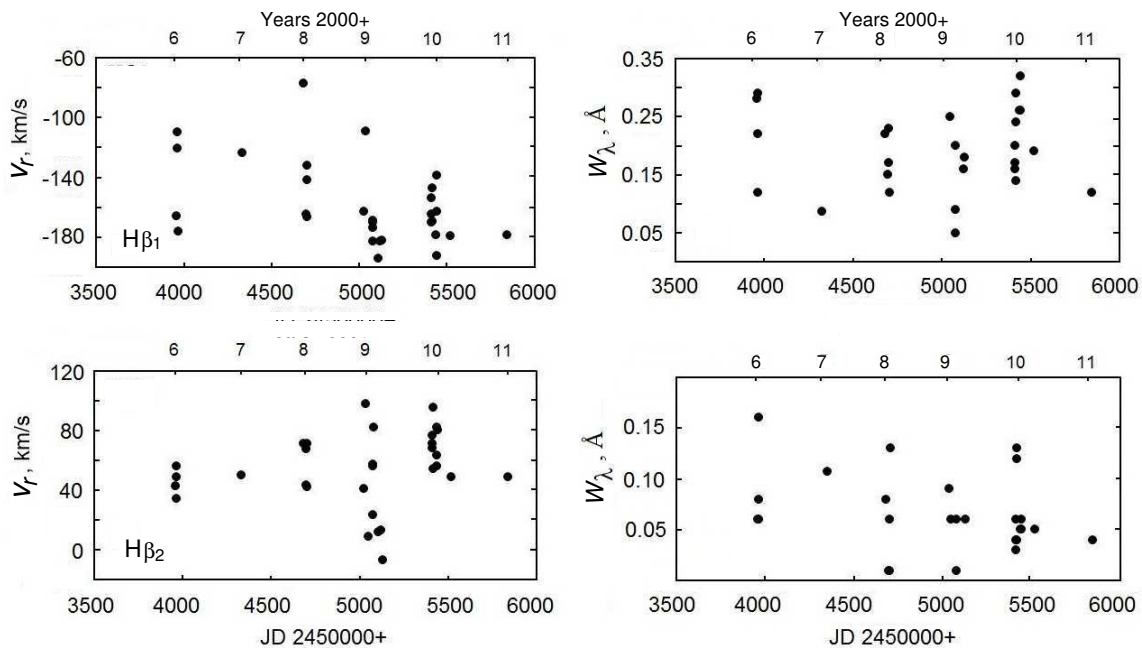


Рис. 4. Изменение лучевых скоростей и модулей эквивалентных ширин отдельных компонентов линии  $H\beta$ .

ся на широкие абсорбционные крылья. В области линии  $H\beta$  отношение  $S/N$  значительно меньше ( $S/N \sim 5-10$ ), поэтому наблюдаемая слабая двухкомпонентная эмиссия в линии на фоне абсорбции с широкими крыльями едва доступна измерениям (Рис. 1). В некоторых случаях уровень  $S/N$  еще меньше, что делает невозможным проведение измерений с достаточной точностью. Мы измерили уверенно выделенные пики эмиссии  $H\beta_1$  (синего компонента) и  $H\beta_2$  (красного компонента). Измеренные значения спектральных параметров  $V_r$ ,  $W_\lambda$  компонентов приведены в Таблицах 2 и 3.

На Рис. 4 приведены зависимости спектральных параметров отдельных компонентов эмиссии  $H\beta$  от времени. Смещение синего компонента  $H\beta_1$  имеет такой же характер, как и для линии  $H\alpha$ , т.е. наблюдается сдвиг в фиолетовую часть спектра. Как видно из Рис. 3 и 4, синий пик линии  $H\alpha$  имеет минимум при  $-106$  км/с, а синий пик линии  $H\beta_1$  — при  $-160$  км/с. У красного компонента эмиссии  $H\beta_2$  наблюдается монотонное смещение в красную часть спектра. Изменение эквивалентных ширин компонентов  $H\beta$  носит иррегулярный характер, причем среднегодовой минимум значений эквивалентных ширин приходится на 2009 г. Наблюдаемое изменение эквивалентных ширин и лучевых скоростей отдельных компонент линии  $H\beta$  свидетельствует о существовании определенного общего механизма их переменности.

### 2.3. Линия $He I \lambda 5876 \text{ \AA}$

Эта линия представляет собой широкую абсорбцию, на которую, по-видимому, накладывается очень слабая эмиссия, разделяющая линию на две части (Рис. 1). В работе [4] определено значение эквивалентной ширины абсорбции, равное  $0.25 \text{ \AA}$ , эквивалентная ширина избыточной эмиссии оценена как  $0.005 \text{ \AA}$ . По всем нашим данным получено среднее значение эквивалентной ширины абсорбции  $0.5 \pm 0.025 \text{ \AA}$  и стандартное отклонение  $0.2 \text{ \AA}$  (Таблица 2).

На Рис. 5 приведены графики, показывающие изменение спектральных параметров этой линии во времени. Как эквивалентные ширины, так и лучевые скорости абсорбции в 2010 г. достигают определенных экстремальных значений. Заметен ход сдвига линии в синюю часть спектра, подобно эмиссии  $H\alpha$ . Эквивалентные ширины дают значительный разброс, а их среднее значение показывает синхронное изменение с лучевыми скоростями. Среднегодовые значения полуширин и центральных глубин этой линии значительных изменений не показывают. Среднегодовая полуширина линии  $He I \lambda 5876 \text{ \AA}$  по всем измерениям имеет наименьшее значение  $4 \text{ \AA}$ , а наибольшее —  $8 \text{ \AA}$ . Оценка по этим данным скорости вращения звезды дает значения около  $200$  км/с и  $400$  км/с соответственно. Такое изменение, скорее, может быть связано с вкладом дополнительного источника в эту линию. Поэтому приведенные в литературе



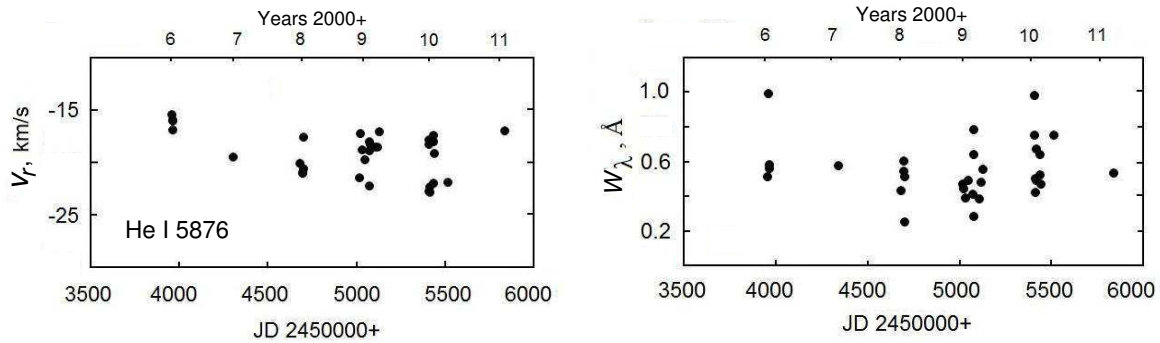


Рис. 5. То же, что на Рис. 4, для линии He I  $\lambda$  5876 Å.

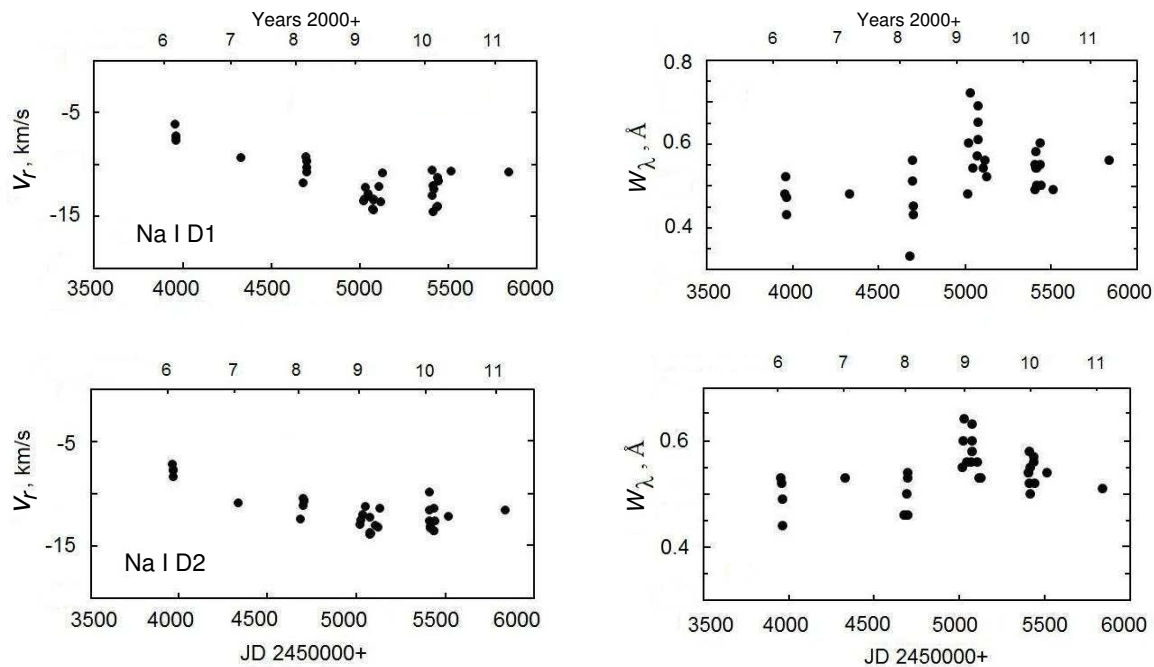


Рис. 6. То же, что и на Рис. 4, для линий дублета Na I D1, D2.

разными авторами значения скорости вращения звезды, определенные по линиям гелия в разное время, значительно различаются (270 км/с [10], 180 км/с [16],  $190 \pm 15$  км/с [4]). Учитывая этот факт, для вычисления скорости вращения звезды нужно брать минимальное значение полуширины линии, при котором скорость вращения по нашим измерениям получена около 200 км/с.

#### 2.4. Линии Na I D1, D2

Известно, что у звезд типа Ae/Be Хербига основная часть линий Na I D1, D2 формируются в протяженной части околозвездной оболочки, и эти линии являются индикатором звездного ветра (см., например, [2]). Для звезды ИЛ Сер мы получили такие же профили дублета, какие были получены

в обзорной работе [2]. В пределах нашего разрешения не выявляется структура профиля дублета натрия, поэтому вклад околозвездного компонента в структуре линии не выделяется. Согласно нашим измерениям, приведенным в Таблицах 2 и 3 и на Рис. 6, исключая данные 2009–2010 гг., эквивалентные ширины компонент дублета не показывают значительных изменений в пределах ошибок измерений. Лучевые скорости этих линий показали монотонное смещение в синюю часть спектра, изменяясь в пределах от  $-6$  до  $-14$  км/с, достигая экстремума в 2009–2010 гг. Как видно из Таблицы 3 среднее значение лучевых скоростей у линий Na I D1, D2 по всем измерениям составляет около  $-12$  км/с с дисперсией 2 км/с. В целом, характер переменности в линиях Na I D1, D2 такой же, как у

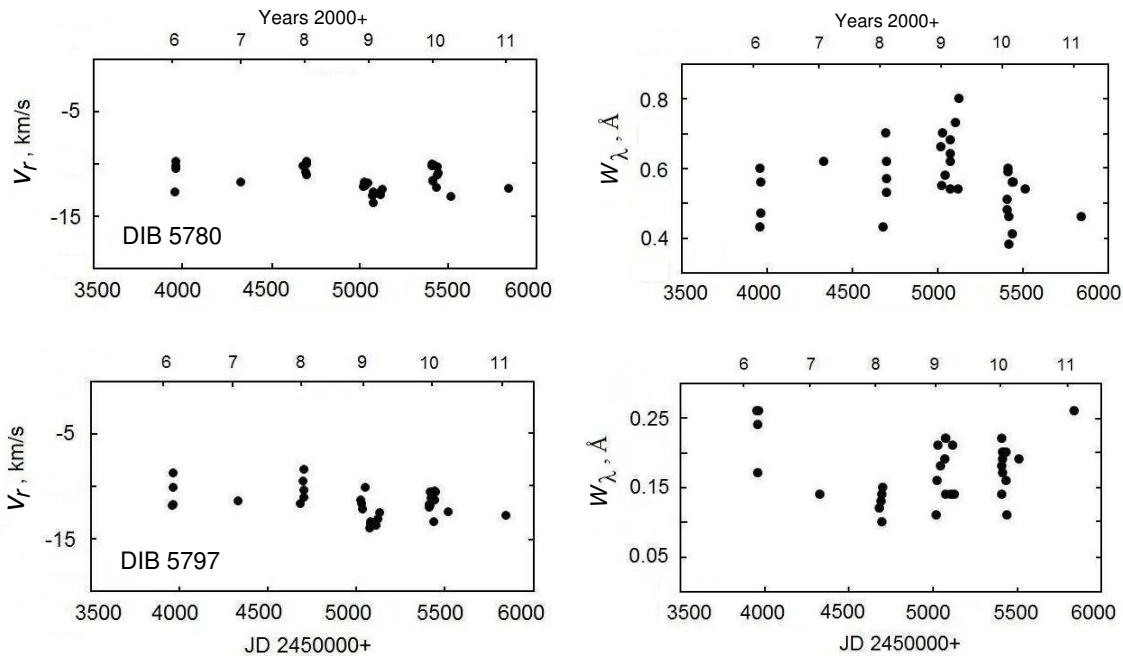


Рис. 7. То же, что и на Рис. 4, для DIB  $\lambda\lambda$  5780, 5797 Å.

эмиссионных линий водорода. Это свидетельствует о том, что основной вклад в переменность линий D1, D2 дает околозвездная оболочка. На Рис. 6 приведена также зависимость эквивалентных ширин абсорбции дублета Na I D1, D2 от времени. Средние значения эквивалентных ширин обеих линий дублета однозначно достигли максимума в 2009–2010 гг. В остальные даты наблюдений у эквивалентных ширин отклонение от среднего практически не превышает уровень ошибок измерений  $3\sigma$ .

Среднее значение полуширин этих линий по всем наблюдениям равно  $1.0 \text{ \AA}$  с дисперсией  $0.18 \text{ \AA}$ , причем в отдельных случаях в течение одного сезона на полуширины менялись на  $0.5 \text{ \AA}$ .

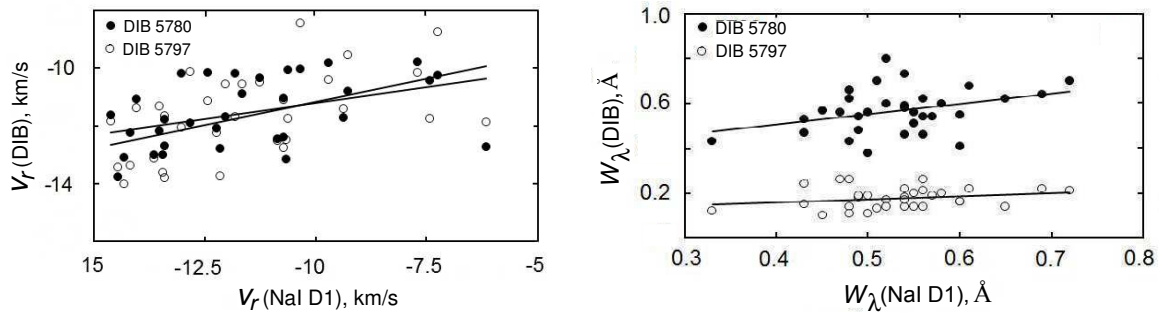
### 2.5. Диффузные межзвездные полосы (DIB)

В спектре звезды нами были обнаружены диффузные межзвездные полосы  $\lambda 5780 \text{ \AA}$  и  $\lambda 5797 \text{ \AA}$ . Известно, что эти полосы обычно образуются в межзвездной или околозвездной газопылевой среде и часто наблюдаются в спектрах звезд ранних спектральных классов OB с протяженными околозвездными оболочками (см., например, [21]). В работах [22, 23] проведено детальное исследование DIB для отдельных звезд. У звезд типа Ae/Be Хербига о наблюдении DIB было сообщено в работах [24–27]. По мнению Галазутдинова и др. [27] обнаруженное в спектрах звезд незначительное изменение параметров DIB может быть результатом

изменения физических условий в околозвездных оболочках. Поэтому, у таких звезд, как звезды типа Ae/Be Хербига переменность со временем параметров DIB может быть индикатором процессов, которые часто наблюдаются в околозвездных газопылевых оболочках этих звезд.

Спектральные параметры этих полос были измерены по всем спектрограммам и вместе с другими данными приведены в Таблицах 2 и 3. Согласно измерениям [23], отношение значений эквивалентных ширин этих полос  $W(\lambda 5780 \text{ \AA})/W(\lambda 5797 \text{ \AA})$  в спектре у разных звезд меняется от 1.5 до 3, а по нашим измерениям у IL Cep при среднем значении 3 это отношение меняется в пределах 2–5. Отношение средних значений полуширин этих полос  $\text{FWHM}(\lambda 5780 \text{ \AA})/\text{FWHM}(\lambda 5797 \text{ \AA})$  по данным [23] составляет около 2.1, а по нашим измерениям у IL Cep — от 1.3 до 2.2.

При вычислении лучевых скоростей по этим полосам нами были использованы значения длин волн  $\lambda 5780.37 \text{ \AA}$  и  $\lambda 5796.96 \text{ \AA}$ , приведенные в работе [21]. Как видно из Таблицы 3, средние значения лучевых скоростей по этим полосам составляют  $-11.5 \pm 1.2$  и  $-11.7 \pm 1.4$  км/с соответственно. При этом стандартное отклонение от среднего не превосходит ошибок измерений. Отметим, что средние значения лучевых скоростей по DIB хорошо согласуются со скоростью по линиям межзвездного поглощения Ca II H, K ( $-11$  км/с), приведенной в [10].



**Рис. 8.** Слева: зависимость лучевых скоростей линии NaI D1 (абсцисса) от лучевых скоростей DIB  $\lambda\lambda$  5780, 5797 Å (ордината). Справа: аналогичная зависимость для эквивалентных ширин этих линий.

Для примера на Рис. 7 приведено изменение измеренных спектральных параметров DIB  $\lambda\lambda$  5780, 5797 Å со временем. Как видно, в целом лучевые скорости этих линий не показывают переменности со временем. Значения эквивалентных ширин меняются в пределах 15–20% что значительно превосходит уровень ошибок измерений  $3\sigma$ .

Нами был вычислен коэффициент корреляции между эквивалентными ширинами и лучевыми скоростями DIB и дублета NaI D1, D2. На Рис. 8 слева приведено сравнение эквивалентной ширины линии NaI D1 и эквивалентных ширин DIB  $\lambda$  5780 Å (темные кружки) и  $\lambda$  5797 Å (светлые кружки). Здесь корреляция относительно слаба:  $K = 0.35 \pm 0.15$  для полосы  $\lambda$  5780 Å, и  $K = 0.24 \pm 0.16$  для полосы  $\lambda$  5797 Å. На правой панели Рис. 8 приведено аналогичное сравнение лучевых скоростей тех же линий. Коэффициент корреляции между лучевыми скоростями линии NaI D1 и указанных DIB здесь заметно больше —  $K = 42 \pm 0.14$  и  $K = 0.51 \pm 0.13$  соответственно.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Еще в работах Гармани [10, 15] было показано, что звезда Ил Сер принадлежит сравнительно молодому скоплению в ассоциации Сер OB3. Согласно измерениям [15], скорость движения межзвездных облаков водорода в районе звезды равна от  $-5$  до  $+17$  км/с. Звезды в ассоциации OB3, членом которого является также Ил Сер, имеют лучевые скорости в пределах от  $-5$  до  $-70$  км/с, и в среднем около  $-20$  км/с [10]. В работе [11] выдвинуто предположение, что эта группа молодых OB звезд имеет возраст примерно  $4 \times 10^5$  лет, и, возможно, обязана своим происхождением взрыву сверхновой.

Лучевые скорости звезды по двум спектрограммам были измерены в [3], их результаты отдельных измерений  $V_r$  по компонентам водородных линий

хорошо согласуются с нашими измерениями. Также неплохо согласуются данные по смещениям линий межзвездного происхождения. Наши систематические измерения впервые показали, что меняются лучевые скорости эмиссионных линий водорода  $H\alpha$ ,  $H\beta$  и синхронно с ними, но более слабо, лучевые скорости линий HeI  $\lambda$  5876 Å и NaI D1, D2. Судя по монотонности изменений лучевых скоростей у большинства спектральных линий в интервале времени 5–6 лет, можно отметить, что мы наблюдали определенную часть динамического процесса, который происходит у звезды Ил Сер.

Профили линий  $H\alpha$  и  $H\beta$  имеют двухкомпонентную структуру (Рис. 1). Профиль линии  $H\alpha$  показывает значительную переменность сдвига вершины, в то время как эквивалентная ширина ее остается относительно стабильной. Когда пики  $H\alpha$  не наблюдаются разделенными, по данным 2006–2007 гг., единственный пик линии имеет красное смещение. Начиная с 2008 г. стали наблюдаться два едва разделенных пика эмиссии. Обнаруженное нами смещение сильнее пика линии  $H\alpha$  на 200 км/с (Рис. 2) может быть либо результатом реального смещения одного пика, либо чередованием усиления интенсивности сначала красного, а затем фиолетового компонента эмиссии, что создает видимое смещение пика. В любом случае наблюдаемая переменность происходит вследствие определенных динамических процессов. Как видно из Рис. 3, лучевые скорости отдельных пиков в линии  $H\alpha$  меняются практически синхронно. Отметим, что в области диска, где формируются компоненты линии  $H\beta$ , наблюдаются более высокие значения скоростей движения вещества. Это может указывать на то, что во внутренней части звездной оболочки скорость истечения вещества должна быть значительно больше. Это свидетельствует о существовании сложной околосредной структуры в системе. Несмотря на то, что наблюдается изменение лучевых скоростей отдельных компонентов и у

линий H $\beta$ , точность их определения не так высока, как в случае линии H $\alpha$ , чтобы определить ход изменений.

Существование определенной слабой корреляции между спектральными параметрами DIB  $\lambda\lambda$ 5780, 5797 Å и NaI D1, D2 говорит о том, что в линиях дублета натрия имеется некоторый вклад межзвездного газа, находящегося в непосредственной близости от звезды. Наши измерения показали, что скорость движения межзвездных облаков не меняется, а лучевые скорости и эквивалентные ширины линий NaI D1, D2 имеют некоторую переменную составляющую. Мы склонны считать, что изменение параметров этих линий происходит за счет изменности физических условий, происходящих в оболочке звезды.

Изменения спектральных параметров отдельных линий показали, что в 2009–2010 гг. мы наблюдали максимально высокие значения лучевых скоростей. Можно считать, что 2010 г. является поворотным моментом в орбитальном движении. Одновременно, можно заметить синхронность в изменениях спектральных параметров отдельных линий. Судя по графикам, приведенным на Рис. 3–6, можно полагать, что наши наблюдения охватывают только один не полный орбитальный цикл. По данным наблюдений 2011 г. значения лучевых скоростей стали меняться в обратную сторону (последняя точка на Рис. 3–4). Ожидаемый орбитальный период системы может быть не меньше 5–6 лет. Очевидно, что при расстоянии до звезды 730 пк, видимое угловое расстояние до второго компонента должно быть значительно меньше величины 0"4, которая была найдена в [17] для ближайшего компонента. Если период двойной системы составляет 5–6 лет, то при допустимой суммарной массе компонентов 2–4  $M_{\odot}$  расстояние между компонентами должно быть около 2.1–2.6 а.е. Для уточнения вопроса кратности системы нужны дальнейшие высокоточные спектральные наблюдения.

Таким образом, мы можем сделать следующие выводы.

1. Долговременное исследование спектральных параметров IL Cep, как у линий водорода, так и у остальных линий свидетельствует о значительном изменении спектра звезды в разные годы. Выявлено медленное изменение лучевых скоростей и эквивалентных ширин, которые достигли экстремумов в 2009–2010 гг.
2. В спектре звезды типа Be Хербига IL Cep обнаружены DIB  $\lambda\lambda$ 5780, 5798 Å, которые не показывают изменности лучевых скоростей со временем. Выявлена слабая корреляция в спектральных параметрах линий DIB и дублета Na I D1, D2.

Это указывает на то, что часть этих линий имеет общее происхождение.

3. Наблюдаемая переменность спектра звезды может быть результатом орбитального движения в двойной или кратной системе.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики (грант EIF-2011-1(3)-82/31/1). Работа частично поддержана грантом TWAS (№ 10-118 RG/PHYS/AS\_G UNESCO FR: 3240245998). Авторы благодарны Н. Н. Самусю за редактирование текста и за полезную дискуссию, а также рецензенту за полезные замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. H. Herbig, *Astrophys. J. Suppl.* **4**, 337 (1960).
2. U. Finkenzeller and R. Mundt, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **55**, 109 (1984).
3. U. Finkenzeller and I. Jankovics, *Astronom. and Astrophys.* **57**, 285 (1984).
4. T. Böhm and C. Catala, *Astronom. and Astrophys.* **57**, 285 (1984).
5. J. Bouvier, S. H. P. Alencar, T. J. Harries, et al., in *Protostars and Planets V*, Ed. by B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil (Univ. Arizona Press, Tucson, 2007) p. 479.
6. J. A. Eisner, B. F. Lane, L. A. Hillenbrand, et al., *Astrophys. J.* **613**, 1049 (2004).
7. J. D. Monnier, R. Millan-Gabet, R. Billmeier, et al., *Astrophys. J.* **624**, 832 (2005).
8. J. S. Vink, J. E. Drew, T. J. Harries, and R. D. Oudmaijer, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **337**, 356 (2002).
9. H. Zinnecker and H. Yorke, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **45**, 481 (2007).
10. C. D. Garmany, *Astronom. J.* **78**, 185 (1973).
11. G. E. Assousa, W. Herbst, and K. C. Turner, *Astrophys. J.* **218**, L13, (1977).
12. G. Hill, *Astrophys. J. Suppl.* **14**, 263 (1967).
13. N. N. Samus, O. V. Durlevich, E. V. Kazarovets, et al., GCVS database, Version 2012, <http://www.sai.msu.ru/gcvs/>.
14. G. Hill, R. W. Hilditch, E. L. Pfannenschmidt, et al., *Publ. Dom. Astrophys. Observ.* **15**, 1 (1976).
15. C. D. Garmany, *Astronom. J.* **77**, 38 (1972).
16. V. S. Shevchenko, E. A. Vitrichenko, K. N. Grankin, et al., *Astron. Lett.* **19**, 125 (1993).
17. H. E. Wheelwright, R. D. Oudmaijer, and S. P. Goodwin, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **401**, 1199 (2010).
18. X. М. Микаилов, В. М. Халилов, И. А. Алекберов, *Циркуляр ШАО* **109**, 21 (2005).
19. Н. З. Исмаилов, А. А. Алиева, Н. Я. Ахмедова, *Известия НАН Азербайджана* **XXV**, 234 (2005).

20. Г. А. Галазутдинов, Препринт САО РАН, № 92 (1992).
21. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astron. Rep.* **48**, 1005 (2004).
22. S. O. Tuairisg, J. Cami, B. H. Foing, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **142**, 225 (2000).
23. J. A. Thorburn, L. M. Hobbs, B. J. McCall, et al., *Astrophys. J.* **584**, 339 (2003).
24. A. S. Miroshnichenko, K. S. Bjorkman, E. L. Chentsov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **377**, 854 (2001).
25. A. Natta, V. P. Grinin, and V. Mannings in *Protostars and Planets IV*, Ed. by V. Mannings, A. P. Boss, and S. S. Russell (Univ. Arizona Press, Tucson, 2000), p. 559.
26. S. L. A. Vieira, M. A. Pogodin, and G. A. P. Franco, *Astronom. and Astrophys.* **345**, 559 (1999).
27. G. A. Galazutdinov, O. A. Galazutdinova, and V. P. Grinin, *Astronom. and Astrophys.* **407**, 705 (2003).

### Spectral Variability of IL Cephei

**N. Z. Ismailov, G. G. Bakhaddinova, O. B. Khalilov, Kh. M. Mikailov**

The results of six years of spectroscopic studies of the Herbig Be star IL Cep (HD 216629) are reported. Various spectral parameters of the  $H\alpha$  and  $H\beta$  emission lines and those of the He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$  absorption feature are found for the first time to have exhibited slow variations in 2006–2011 and to have reached their extrema in 2009–2010. The Na I D1 and D2 lines reproduce, in a weaker form, the  $H\alpha$  radial-velocity variations. It is suggested that the variations found in the spectrum of the star may be due to the presence of additional bodies in the system.

Keywords: *Sun: stars: variables: Herbig Ae/Be—binaries—stars: individual: IL Cep*