

## СТРУКТУРА ВНУТРЕННИХ ОБЛАСТЕЙ ОКОЛОЗВЕЗДНЫХ ГАЗОВЫХ ОБОЛОЧЕК МОЛОДЫХ ГОРЯЧИХ ЗВЕЗД. II. НОВЫЙ ЦИКЛ СПЕКТРАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ Ae-ЗВЕЗДЫ ХЕРБИГА HD 31648

О.В.КОЗЛОВА, И.Ю.АЛЕКСЕЕВ, Д.Н.ШАХОВСКОЙ

Поступила 15 мая 2007

Принята к печати 18 июля 2007

Приводятся результаты многолетнего спектрального мониторинга Ae-звезды Хербига HD 31648 в области эмиссионной линии  $H\alpha$ , линий резонансного дублета натрия Na I D и ИК триплета кислорода OI 7774. Подтвержден вывод, сделанный в предыдущих работах, о том, что спектральная переменность звезды в области эмиссионной линии  $H\alpha$  носит циклический характер. Она проявляется себя в изменении эквивалентной ширины и интенсивности эмиссии линии на шкале времени около 1200 суток. Показано, что ветер у HD 31648 неоднородный и состоит из нескольких компонент, различающихся по скорости истечения. Они наблюдаются как в линии  $H\alpha$ , так и в линиях резонансного дублета натрия Na I D. Параметры компонент меняются в зависимости от фазы с цикла активности звезды (в максимуме активности скорость и плотность ветра достигают наибольших значений, а затем постепенно уменьшаются). Исследование быстрой спектральной переменности линии гелия He I 5876 с характерным временем несколько часов показало существование корреляции между изменением синего и красного крыла линии. Это указывает на существование взаимозависимости между процессами аккреции и истечения. Такая взаимосвязь следует, в частности, из результатов моделирования ветра у молодых звезд, выполненных в рамках магнитоцентробежной модели, применимость которой к HD 31648 была рассмотрена в предыдущих работах. В представленной работе мы подтверждаем это на новом материале. Обнаружены слабые изменения блеска звезды (на  $0^m.2$ ), которые согласуются с обнаруженной циклической переменностью (в максимуме активности блеск звезды немного слабее). Такие изменения хорошо объясняются процессом выноса ветром пыли из околозвездного диска, который усиливается в максимуме активности. Анализ переменности других спектральных линий показал существование связи между изменением линии  $H\alpha$  и линиями резонансного дублета натрия Na I D и KI 7698. Существует также слабая связь между изменением линий Na I D и линией гелия He I 5876. Поскольку области формирования линий натрия и гелия существенно различны, мы можем заключить, что процессы, ответственные за циклическую переменность, охватывают протяженную область диска и ветра. Мы полагаем, что наиболее вероятной причиной обнаруженной циклической переменности является перестройка внутренней структуры околозвездной газовой оболочки, вызванной присутствием маломассивного компаньона или планеты.

Ключевые слова: *звезды; звездный ветер - объект: HD 31648*

1. *Введение.* Представленная работа является второй в данной серии (первая работа представлена в [1]) и посвящена анализу многолетнего спектрального мониторинга Ae-звезды Хербига HD31648.

Эта звезда относится к группе фотометрически спокойных молодых звезд, с признаками истечения вещества. Их околозвездные (CS) диски

ориентированы по отношению к наблюдателю под промежуточными углами, благодаря чему на луче зрения оказывается область звездного ветра (см., [2]). В этом случае у эмиссионной линии  $\text{H}\alpha$  наблюдается профиль типа P Суг, со смещенным в синюю сторону абсорбционным компонентом. Промежуточный наклон ее диска подтверждают и данные [3].

Спектральный класс звезды A2-A3e [4]. Амплитуда фотометрической переменности не превышает нескольких десятых зв. величины.

Представленные ниже данные наблюдений частично уже были опубликованы ранее в [5] и [6]. Как показали результаты этих работ, внутренние слои аккреционного диска HD31648 подходят непосредственно к звезде. Образующаяся в этой области высокоскоростная компонента ветра состоит из отдельных плотных струй, начальные скорости которых лишь не намного превышают скорость убегания у поверхности звезды, в результате чего образуется истечение газа с замедлением.

В целом, структура излучающей области HD 31648 хорошо согласуется с магнито-центробежными моделями дискового ветра, в которых главную роль в ускорении вещества играет собственное магнитное поле аккреционного диска (см. [7]).

Как было отмечено в [6], спектральная переменность звезды в период с 1998 по 2004гг. характеризовалась изменением эквивалентной ширины и интенсивности эмиссионной линии  $\text{H}\alpha$  с характерным временем около 3 лет. Аналогичное поведение показали также лучевые скорости и глубины смещенных в синюю сторону абсорбционных компонент линии (другие линии в работе [6] не рассматривались). Это позволило заподозрить существование цикла активности у звезды, связанного с изменением параметров ветра.

В данной работе мы представляем результаты наблюдений, полученных в 2005-2006гг., которые показали развитие нового цикла активности и, тем самым, подтвердили реальность циклических изменений у HD 31648. Кроме них, в представленный ниже анализ включены результаты работ [5] и [6], а также более ранние данные, полученные из публичного архива Ritter обсерватории университета Толедо.

Другой важной задачей, рассмотренной в данной работе, стало изучение характера спектральной переменности HD 31648 в других спектральных областях. Для этого были использованы наблюдения линии  $\text{He I } 5876$ , а также линий резонансного дублета  $\text{Na I D}$  и ИК триплета  $\text{OI } 7774$ .

**2. Наблюдения.** Спектральные наблюдения проводились в Крымской астрофизической обсерватории (КраО) в период с 1998 по 2006гг. Все спектры получены с помощью спектрографа Куде на 2.6-м телескопе КраО (ЗТШ), оснащенный ПЗС-камерой. Спектральное разрешение

Таблица 1

## ДАННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ HD31648

Дата	JD	Сп. область	S/N	EW(H $\alpha$ )	Сп. разрешение
1	2	3	4	5	6
98-11-19	2451137.437	H $\alpha$ 6563	50	24.9	0.32
	2451137.410	D Na I	137		0.32
98-12-13	2451161.532	D Na I	24	22.9	0.32
98-12-15	2451163.575	H $\alpha$ 6563	83		0.32
	2451163.526	D Na I	114	29.7	0.32
	2451197.408	H $\alpha$ 6563	72		0.32
99-01-18	2451197.436	D Na I	100	25.5	0.32
	2451199.196	H $\alpha$ 6563	98		0.32
99-01-20	2451199.230	D Na I	117	26.9	0.32
	2451199.437	H $\alpha$ 6563	130		0.32
	2451199.465	D Na I	130	22.6	0.32
	2451227.186	H $\alpha$ 6563	133		0.32
99-02-17	2451227.204	D Na I	100	22.9	0.32
	2451228.184	H $\alpha$ 6563	96		0.32
99-02-18	2451228.270	D Na I	105	25.2	0.32
	2451230.307	H $\alpha$ 6563	36		0.32
99-02-20	2451230.265	D Na I	83	27.7	0.32
	2451242.267	H $\alpha$ 6563	49		0.32
99-03-04	2451242.218	D Na I	115	27.2	0.32
	2451244.241	H $\alpha$ 6563	114		0.32
99-03-06	2451244.196	D Na I	113	26.8	0.32
	2451244.385	H $\alpha$ 6563	75		0.32
	2451244.335	D Na I	110	25.1	0.32
	2451410.522	H $\alpha$ 6563	55		0.32
99-08-19	2451410.530	D Na I	99	27.3	0.32
	2451411.505	H $\alpha$ 6563	58		0.32
99-08-20	2451413.485	H $\alpha$ 6563	76	30.9	0.32
	2451413.517	D Na I	64		0.32
99-08-24	2451415.494	H $\alpha$ 6563	90	24.4	0.32
	2451415.531	D Na I	115		0.32
	2451415.561	OI 7773	53	17.5	0.32
	2451491.383	H $\alpha$ 6563	37		0.32
99-11-08	2451491.334	D Na I	56	21.8	0.32
	2451549.171	H $\alpha$ 6563	61		0.32
00-01-05	2451549.284	OI 7773	58	21.7	0.32
	2451552.182	H $\alpha$ 6563	55		0.32
00-01-08	2451552.211	OI 7773	60	23.2	0.32
	2451904.265	H $\alpha$ 6563	50		0.32
00-12-25	2451907.277	H $\alpha$ 6563	55	21.8	0.32
	2451907.305	D Na I	46		0.32
01-01-26	2451936.170	H $\alpha$ 6563	48	22.1	0.32
	2451936.212	D Na I	56		0.32
01-02-10	2451951.177	H $\alpha$ 6563	45	22.7	0.32
	2451951.235	D Na I	55		0.32
01-03-14	2451983.237	H $\alpha$ 6563	33	22.0	0.32
	2451983.253	OI 7773	90		0.64

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
01-03-17	2451986.228	H $\alpha$ 6563	46	24.5	0.32
	2451986.245	OI 7773	145		
01-09-20	2452173.456	H $\alpha$ 6563	51	18.3	0.32
	2452173.484	Na I D	75		
	2452173.539	OI 7773	65		
01-11-17	2452231.158	H $\alpha$ 6563	49	25.8	0.32
01-12-27	2452261.267	H $\alpha$ 6563	49	20.5	0.32
02-03-12	2452346.232	H $\alpha$ 6563	83	26.4	0.32
	2452346.259	D Na I	80		
02-03-13	2452347.250	H $\alpha$ 6563	74	25.8	0.32
	2452347.277	OI 7773	70		
02-03-14	2452348.207	H $\alpha$ 6563	70	22.4	0.32
02-08-29	2452516.476	H $\alpha$ 6563	80	16.5	0.32
02-08-31	2452518.464	H $\alpha$ 6563	80	16.4	0.32
02-10-12	2452560.397	H $\alpha$ 6563	75	26.2	0.32
02-11-02	2452581.333	H $\alpha$ 6563	57	26.6	0.32
02-11-07	2452586.482	H $\alpha$ 6563	105	21.6	0.32
02-11-08	2452587.419	H $\alpha$ 6563	80	23.5	0.32
	2452587.512	OI 7773	94		
02-11-13	2452592.305	H $\alpha$ 6563	97	21.3	0.32
02-11-14	2452593.447	H $\alpha$ 6563	96	19.7	0.32
03-01-25	2452665.207	H $\alpha$ 6563	71	24.9	0.32
	2452665.271	OI 7773	94		
03-01-26	2452666.219	H $\alpha$ 6563	52	25.7	0.32
	2452666.219	OI 7773	92		
03-02-23	2452694.199	H $\alpha$ 6563	96	24.9	0.32
	2452694.271	OI 7773	117		
03-02-27	2452698.209	H $\alpha$ 6563	110	23.3	0.32
	2452698.275	OI 7773	115		
03-03-11	2452710.297	H $\alpha$ 6563	97	21.6	0.32
03-03-24	2452723.219	H $\alpha$ 6563	91	21.7	0.32
03-03-31	2452730.183	H $\alpha$ 6563	99	22.4	0.32
03-04-02	2452732.183	H $\alpha$ 6563	89	23.3	0.32
03-08-17	2452869.563	H $\alpha$ 6563	93	18.9	0.32
03-08-18	2452870.524	H $\alpha$ 6563	90	16.9	0.32
03-08-20	2452872.513	H $\alpha$ 6563	88	17.0	0.32
03-11-29	2452973.380	H $\alpha$ 6563	54	21.3	0.32
	2452973.582	OI 7773	52		
03-11-30	2452974.396	H $\alpha$ 6563	92	22.5	0.32
	2452974.496	OI 7773	89		
03-12-14	2452988.305	H $\alpha$ 6563	101	22.6	0.32
	2452988.383	OI 7773	107		
03-12-29	2453002.527	H $\alpha$ 6563	66	20.9	0.32
03-12-30	2453003.424	H $\alpha$ 6563	99	22.6	0.32
04-01-27	2453032.211	H $\alpha$ 6563	56	22.9	0.32
	2453032.275	OI 7773	100		
04-01-31	2453035.557	H $\alpha$ 6563	53	20.8	0.32
	2453035.624	OI 7773	84		
04-02-22	2453058.217	H $\alpha$ 6563	63	22.8	0.32

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6
04-08-21	2453239.515	H $\alpha$ 6563	83	25.0	0.32
04-08-25	2453243.518	H $\alpha$ 6563	96	25.0	0.32
04-09-01	2453250.452	H $\alpha$ 6563	97	21.2	0.32
04-10-30	2453309.280	H $\alpha$ 6563	45	18.9	0.32
04-11-06	2453316.251	H $\alpha$ 6563	46	18.8	0.32
04-11-12	2453322.260	H $\alpha$ 6563	30	21.7	0.32
05-01-09	2453380.469	H $\alpha$ 6563	25	19.4	0.32
05-01-12	2453383.344	H $\alpha$ 6563	178	22.0	0.32
05-02-17	2453419.232	H $\alpha$ 6563	82	21.4	0.32
05-03-06	2453436.300	H $\alpha$ 6563	57	19.8	0.32
05-12-09	2453626.433	H $\alpha$ 6563	59	25.5	0.32
05-10-13	2453657.509	H $\alpha$ 6563	100	22.0	0.32
05-10-25	2453669.387	H $\alpha$ 6563	58	25.5	0.32
05-11-09	2453684.467	H $\alpha$ 6563	67	20.2	0.32
05-12-20	2453725.288	H $\alpha$ 6563	14	27.3	0.32
05-12-28	2453733.198	H $\alpha$ 6563	40	25.5	0.32
06-01-11	2453747.209	H $\alpha$ 6563	63	24.4	0.32
06-04-02	2453828.213	H $\alpha$ 6563	25	26.1	0.32
06-04-24	2453850.223	H $\alpha$ 6563	18	30.0	0.32

составило около 0.3 Å. Всего было получено 76 спектров в области эмиссионной линии H $\alpha$ , 20 спектров в области линий Na I D и 17 спектров в области триплета OI 7774. Данные о датах наблюдений, величине  $S/N$  и эквивалентной ширине  $EW$  линии H $\alpha$  приведены в табл.1.

При определении эквивалентной ширины и интенсивности эмиссионной линии H $\alpha$  проводилось вычитание фотосферного профиля, который рассчитывался методом синтетического спектра с помощью программы SYNTH Пискунова [8] и Венской базы атомных линий VALD[9]. При расчете были приняты следующие параметры:  $T_{\text{eff}} = 9200$ ,  $\log g = 4.0$ ,  $V \sin i = 90$  км/с (см. [5]). Результирующая ошибка определения параметров не превышает 1 Å для  $EW(H\alpha)$ , 0.1 для интенсивности  $I$  и 5 км/с для значений лучевых скоростей.

Все данные рассматривались в гелиоцентрической системе и не переводились в систему отсчета, связанную со звездой.

Полученные результаты дополнены данными Бескровной и Погодина [10], представляющими собой 11 спектров в области линии H $\alpha$ , и 9 спектров в области линий натрия Na I D, полученных в период с 1996 по 1998гг. в КрАО на том же телескопе, что и представленные наблюдения. Используются также 9 спектров в области линии H $\alpha$  из публичного архива Ritter обсерватории университета Толедо, полученных в период с 1993 по 1998гг. С целью получения однородного материала, эти спектры были обработаны по единой методике.

В период с 1998 по 2000гг. в КрАО на телескопе АЗТ-11 проводились также фотометрические наблюдения HD 31648 с помощью *UBVRI* фотометра - поляриметра. Средняя ошибка в полосе *U* составила  $0^m.04$ .

### 3. Результаты наблюдений.

3.1. *Линия H $\alpha$* . Как уже упоминалось выше, эмиссионная линия *H $\alpha$*  имеет профиль типа P Cug, характерный для молодых звезд, с признаками ветра. По данным [6] наиболее заметный вклад в общий вид профиля оказывают две абсорбционные компоненты, формирующиеся преимущественно в области низких значений лучевых скоростей (около -100 км/с) - компонента I, и сравнительно высоких (около -200 км/с) - компонента II. В отдельные ночи заметна и третья компонента III, скорость которой достигает -350 км/с и более, а время переменности составляет несколько часов. В некоторые ночи эти компоненты могут сливаться, формируя широкую абсорбцию с плоским дном.

В работе [6] для исследования переменности эмиссии были использованы несколько параметров: *EW* - эквивалентная ширина эмиссии, *I* - интенсивность эмиссии,  $V_{abs}$  и  $I_{abs}$  - соответственно лучевая скорость

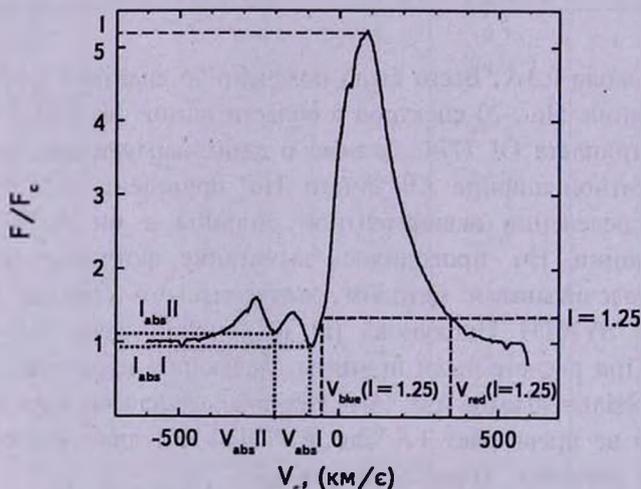


Рис.1. Пример определения основных параметров эмиссионного профиля линии *H $\alpha$* , наблюдаемой в спектре HD 31648: интенсивности эмиссии *I*, интенсивности абсорбционных компонент  $I_{abs}$ , лучевых скоростей эмиссионных компонент  $V_{abs}$ , а также синей  $V_{blue}$  ( $I=1.25$ ) и красной  $V_{red}$  ( $I=1.25$ ) границ эмиссионного профиля на уровне интенсивности  $I=1.25$  (из наблюдаемого профиля предварительно вычтен фотосферный).

и интенсивность смещенных в синюю сторону абсорбционных компонент (пример определения этих величин показан на рис.1).

Новые зависимости этих параметров от времени показаны на рис.2а. Здесь вместе с данными, опубликованными в [6], отмечены результаты наблюдений 2005 и 2006гг., а также данные, полученные из публичного

архива 1-м телескопа Ritter обсерватории. Как следует из рисунка, все исследованные параметры показывают быструю переменность на шкале времени несколько дней. Однако гораздо более интересной является волнообразная переменность на шкале времени около 3.3 года (1200 суток), сопровождающаяся увеличением максимальных значений  $EW$ ,  $I$ , а также скоростей абсорбционных компонент и их глубин (черными кружками показана компонента I, белыми - компоненты II и III). Новые данные дополняют полученные ранее результаты и свидетельствуют в пользу наличия циклической переменности, существование которой было заподозрено в [6].

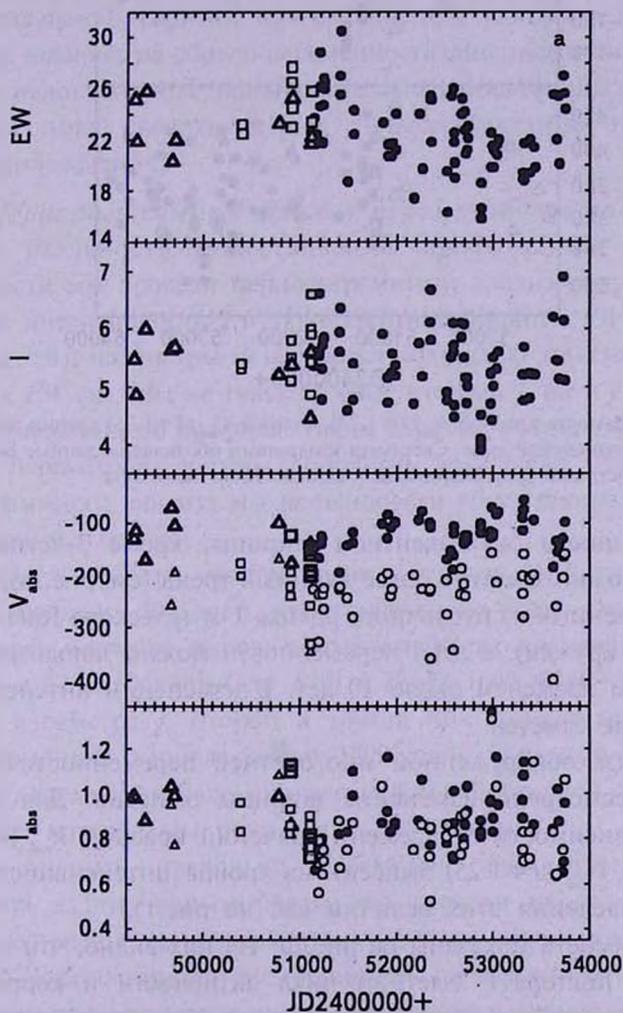


Рис.2а. Зависимость эквивалентной ширины эмиссионной линии  $\text{Na}$   $EW$ , ее интенсивности  $I$ , а также лучевых скоростей  $V_{\text{abs}}$  и интенсивности  $I_{\text{abs}}$  смещенных в синюю сторону абсорбционных компонент (темные кружки - низкоскоростной абсорбционный компонент, светлые кружки - высокоскоростной абсорбционный компонент, большими и маленькими квадратами обозначены данные Бескровной и Погодина [10], светлыми треугольниками - данные Ritter телескопа).

Для объяснения наблюдаемой переменности в [6] была предложена феноменологическая модель, в которой дисковый ветер состоит из нескольких струй, отличающихся скоростью истечения вещества. В максимуме активности скорость струй достигает наибольших значений, а затем постепенно падает, усиливаясь к началу следующего цикла. Новые данные, показанные на рис.2а, подтверждают этот результат.

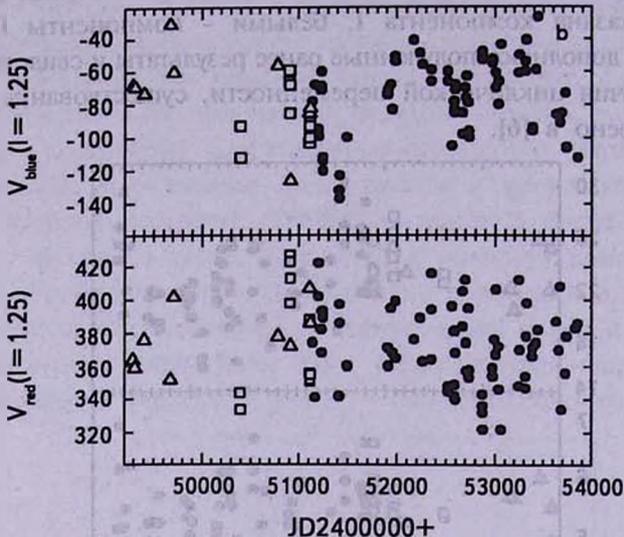


Рис.2б. Зависимость красной  $V_{red}(I=1.25)$  и синей  $V_{blue}(I=1.25)$  границ эмиссионного профиля  $H\alpha$  от юлианской даты. Светлыми квадратами обозначены данные Бескровной и Погодина [10], светлыми треугольниками - данные Ritter телескопа.

В переменности эквивалентной ширины, кроме 3-летнего цикла активности, можно заметить более длинный тренд (см. рис.2а). С учетом данных, полученных из публичного архива 1-м телескопа Ritter обсерватории (белые кружки), в этой переменности можно заподозрить волну с характерным временем около 10 лет. В изменении интенсивности  $I$  такой тренд не заметен.

Для анализа обнаруженной многолетней переменности величины  $EW$  было рассмотрено изменение ширины эмиссии. Для этого мы построили зависимости от времени значений красной  $V_{red}(I=1.25)$  и синей границ  $V_{blue}(I=1.25)$  эмиссии на уровне интенсивности  $I=1.25$  (пример определения этих величин см. на рис.1).

Эти зависимости показаны на рис.2б. Из них видно, что изменение  $V_{red}(I=1.25)$  повторяет 3-летний цикл активности и коррелирует с эквивалентной шириной эмиссионной линии  $H\alpha$  (коэффициент корреляции  $r=0.53 \pm 0.12$ ).

Изменение  $V_{blue}(I=1.25)$  более сложное. В нем также прослеживается

3-летний цикл. Однако амплитуда переменности от цикла к циклу изменяется, в результате чего формируется переменность на более длинной временной шкале. Корреляция  $EW(H\alpha)$  и  $V_{blac}$  ( $I=1.25$ ) ( $r=-0.64 \pm 0.15$ ) подтверждает, что наблюдаемое плавное уменьшение эквивалентной ширины  $EW$  в период с 1999 по 2006гг. связано с этой переменностью.

Из рис.2b видно, что в максимуме  $EW$  величина  $V_{blac}$  ( $I=1.25$ ) смещается в синюю сторону. Таким образом, синее эмиссионное крыло ведет себя так же, как лучевые скорости абсорбционных компонент I и II (см. рис.2a). Это позволяет нам связать наблюдаемую переменность  $V_{blac}$  ( $I=1.25$ ) с более низкоскоростной компонентой ветра, которая попадает на область сильного градиента интенсивности, и поэтому не дает отдельной абсорбции, а влияет на общую переменность синего эмиссионного крыла.

Из-за недостаточной продолжительности имеющихся данных мы не можем пока сказать, имеет ли обнаруженная переменность циклический характер.

**3.2. Периодограммный анализ переменности линии  $H\alpha$ .** Для проверки реальности существования обнаруженной циклической переменности мы провели периодограммный анализ полученных рядов изменения интенсивности  $I$  и эквивалентной ширины  $EW$  эмиссионной линии  $H\alpha$ . Эти параметры не являются полностью зависимыми, так как изменения  $EW$  связаны не только с изменениями  $I$ , но и с изменениями ширины эмиссионного профиля. Таким образом, результаты, полученные для этих параметров, должны дополнять друг друга. Для проведения периодограммного анализа мы использовали пакет программ ISDA [11], разработанный Пельтом.

Спектры мощности, построенные для этих двух параметров для периодов, больших 500 дней, представлены на рис.3. Они показывают наличие трех широких пиков, соответствующих временам  $2958 \pm 1000$ ,  $1236 \pm 160$  и  $628 \pm 50$  дней (для  $EW$ ) и  $2894 \pm 1000$ ,  $1260 \pm 200$  и  $648 \pm 60$  дней для параметра  $I$ . Второй и третий пик соответствуют первой и второй гармонике периода около 1200 дней, а первый пик отражает наличие во временном ряде многолетней волнообразной составляющей, о характере которой мы пока судить не можем.

Чтобы оценить, насколько эффективно фурье-преобразование в применении к полученным рядам, мы провели процедуру уточнения периода, постепенно увеличивая число гармоник разложения. Полученные результаты показали отсутствие сходимости последовательности периодов  $P(n)$  с ростом числа гармоник  $n$ . Это означает, что переменность интенсивности и эквивалентной ширины не описывается чисто синусоидальной функцией и для анализа временных рядов должен быть более эффективен метод Лафлера-Кинмана, для которого характер циклических изменений

не имеет значения.

Применение этого метода позволило получить оценку периода  $P$  для обоих параметров  $EW$  и  $I$ , как  $P=1228 \pm 28$  дней. Для дополнительной проверки мы разбили каждый ряд на два (четные и нечетные точки временного ряда) и независимо обработали каждый из этих

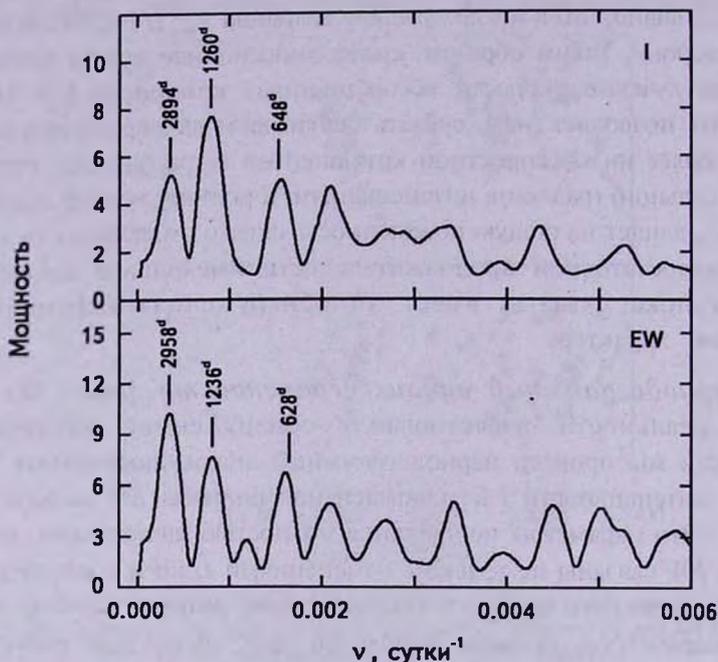


Рис.3. Спектры мощности для полученных рядов изменения интенсивности эмиссии  $I$  и эквивалентной ширины  $EW$  эмиссионной линии  $\text{H}\alpha$  для диапазона, где  $P$  больше 500 суток.

рядов. Сравнение результатов, полученных отдельно для "четного" и "нечетного" ряда позволило оценить  $P=1214 \pm 41$  дней для обоих параметров, что вполне укладывается в пределы точности, достигнутой при обработке полных рядов.

Помимо этого, независимый периодограммный анализ временного ряда для эквивалентной ширины  $EW$  был проведен по нашей просьбе в Лаборатории физики Солнца ГАО РАН (Пулково) Ю.А.Наговицыным (частное сообщение). Были использованы два независимых подхода: корреляционный периодограммный анализ [12] в предположении о существовании точного периода (глобальный анализ) и метод вейв-лет-преобразования [13] в предположении о том, что имеется квазипериод (локальный метод). В обоих случаях был сделан вывод о том, что в ряде присутствует период (квазипериод) около 1250 дней с вероятностью неслучайности более 0.99 с выраженным несинусоидальным профилем.

Это заключение полностью соответствует выводу, сделанному нами на

основе нашего собственного анализа, что свидетельствует в пользу реальности существования обнаруженной циклической переменности. Полученные нами временные ряды охватывают два полных и один неполный период переменности. Продолжение спектральных наблюдений этого интересного объекта должно дать окончательное подтверждение периодичности изменений его спектральных параметров и позволит более точно определить величину периода.

3.3. *Линии резонансного дублета натрия Na I D.* В работе [5] было показано, что профили линий резонансного дублета натрия представляют собой переменную CS-эмиссию, с синей стороны которой расположены узкие абсорбционные компоненты. Их лучевые скорости и глубины меняются от ночи к ночи. Пример этих компонент показан на рис.4а, где можно видеть низкоскоростную I (около  $-70$  км/с), среднескоростную II (около  $-120$  км/с) и высокоскоростную III (около  $-200$  км/с) компоненты. Иногда наблюдается компонента IV, скорость которой составляет более  $-300$  км/с. В этой связи представляет интерес сравнение переменности обнаруженных линий с изменением абсорбционных компонент в линии  $\text{Na } \alpha$ .

На рис.4б показаны результаты такого сравнения. Видно, что лучевая скорость компоненты II Na I D коррелирует с низкоскоростной компонентой I линии  $\text{Na } \alpha$ , а лучевая скорость компоненты III Na I D - с высокоскоростной компонентой II линии  $\text{Na } \alpha$ . Существует также корреляция между переменностью интенсивности CS-эмиссии натрия и

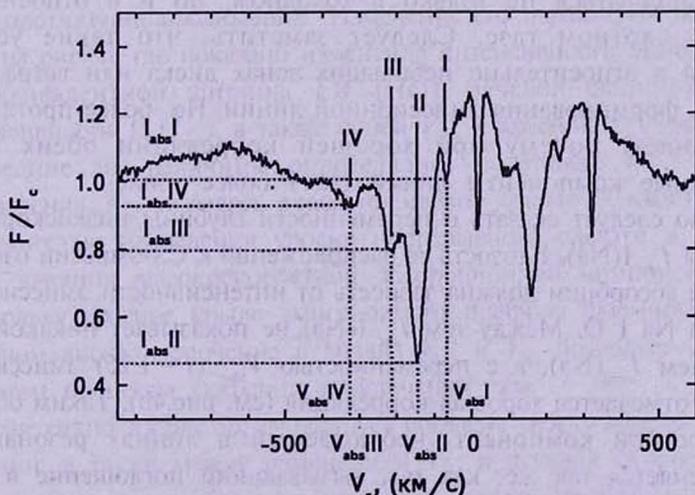


Рис.4а. Смещенные в синюю сторону абсорбционные компоненты линий резонансного дублета натрия Na I D на примере спектра, полученного 18 января 1999г. Римскими цифрами обозначены: I - низкоскоростной компонент, II - среднескоростной компонент, III и IV- высокоскоростные компоненты. Их лучевые скорости и глубины обозначены соответственно значками  $V_{abs}$  и  $I_{abs}$ .

интенсивностью  $H\alpha$  (коэффициенты корреляции показаны на рисунке).

Эти результаты означают, что компоненты I( $H\alpha$ ) и II(Na), II( $H\alpha$ ) и III(Na), а также, по-видимому, III( $H\alpha$ ) и IV(Na), формируются в одних и тех же ветровых структурах.

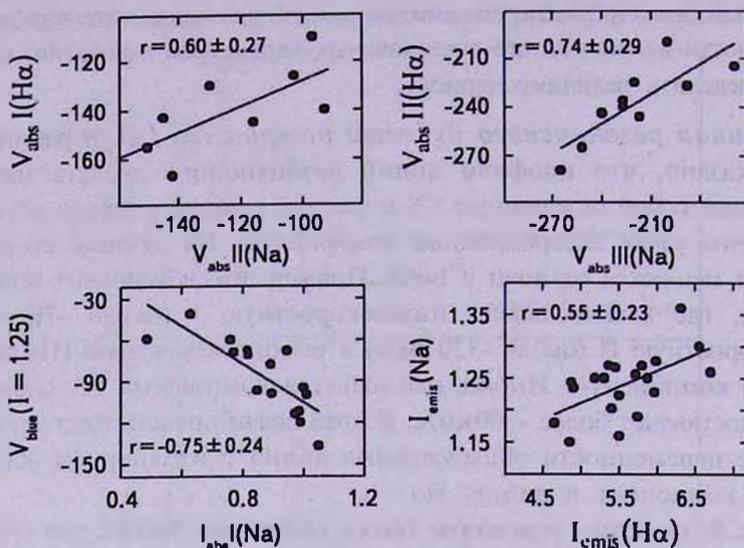


Рис.4b. Связь между изменением линий резонансного дублета натрия и эмиссионной линии  $H\alpha$ .

Полученные данные хорошо согласуются с данными моделирования [14,15], показавших, что CS абсорбционные компоненты линий натрия могут формироваться не только в холодном, но и в относительно горячем и плотном газе. Следует заметить, что такие условия достигаются в относительно небольших зонах диска или ветра, тогда как область формирования эмиссионной линии  $H\alpha$  более протяженна. Это объясняет, почему при хорошей корреляции обеих линий абсорбционные компоненты линий Na I более узкие.

Отдельно следует сказать о переменной глубины низкоскоростной компоненты  $I_{abs} I(Na)$ . Близость ее расположения к CS-эмиссии означает, что глубина абсорбции должна зависеть от интенсивности эмиссионного компонента Na I D. Между тем  $I_{abs} I(Na)$  не показывает никакой связи с изменением  $I_{cmis}(Na)$ , а с переменностью  $V_{blue} (I = 1.25)$  эмиссионной линии  $H\alpha$  отмечается хорошая корреляция (см. рис.4b). Таким образом, низкоскоростной компонент, наблюдаемый в линиях резонансного дублета, меняется так же, как газ, вызывающий поглощение в синем крыле эмиссионной линии  $H\alpha$ .

Это подтверждает вывод, сделанный ранее в разделе 3.1 о том, что в ветре существует более низкоскоростной компонент, попадающий в линии  $H\alpha$  на область сильного градиента интенсивности и по этой

причине наблюдаемого не в виде отдельной абсорбции, а в изменении синего эмиссионного крыла.

3.4. *Линия гелия He I 5876 Å.* Областью формирования линии гелия He I 5876 по данным [16] является горячая компактная область, расположенная в прилегающей к звезде области аккреционного диска. Кроме того, именно здесь, по данным работы [5] происходит процесс формирования высокоскоростной компоненты ветра. Таким образом, характер спектральной переменности линии гелия должен отражать как процессы, связанные с аккрецией газа на звезду, так и процессы, обуславливающие истечение вещества.

Данные наших наблюдений показывают, что He I 5876 в спектре HD 31648 обычно наблюдается в эмиссии. Иногда в ней присутствует абсорбционный компонент, глубина и ширина которого могут сильно меняться как от ночи к ночи, так и на шкале времени несколько часов (см. работу [5], а также результаты Бескровной и Погодина [10]).

В работе [5] такая быстрая переменность линии была показана на примере 2-х спектров, полученных с промежутком около 5 часов. 10 февраля 2001г. для более детального исследования быстрой спектральной переменности мы получили серию из 13 спектров с экспозицией по 20 мин каждый. Полная продолжительность сета составила 4 с половиной часа.

Все полученные профили показаны на рис.5а. Для удобства они сглажены и приведены в шкалу лучевых скоростей. Точками показан уровень континуума. Хорошо видно, что профиль эмиссии менялся на всем протяжении наблюдений. Изменение его параметров можно проследить на рис.5б, где показано изменение интенсивности эмиссии  $I_{max}$  (HeI), ее эквивалентной ширины  $EW$  (HeI), лучевой скорости максимума интенсивности  $V_R(I_{max})$ , а также синей  $V_{blue}$  и красной  $V_{red}$  границ эмиссии. Последние две величины определялись на уровне  $I=1.01$ . Точность определения  $V_{red}$  оказалась довольно низкой (около 30 км/с), что связано с трудностью проведения уровня непрерывного спектра в этой области из-за влияния высокоскоростной абсорбционной компоненты Na I D. Поскольку красное крыло эмиссионного профиля формируется в аккреционном диске, включение в анализ  $V_{blue}$  и  $V_{red}$  позволяет сравнить друг с другом процессы аккреции и истечения газа.

Как видно из рис.5б, существует согласие между переменностью этих величин, а также между изменением  $V_{red}$  и лучевой скоростью эмиссии  $V_R(I_{max})$ . Это подтверждает тесную связь между процессами аккреции и истечения газа: увеличение скорости движения к звезде сопровождается ростом скорости ветра и наоборот (см., например, работы [7,17,18] по моделированию дискового ветра у молодых звезд). Аналогичная

зависимость получается и при рассмотрении переменности гелия на основе всего имеющегося ряда наблюдений ( $r=0.49 \pm 0.20$ ). Она показана на рис.6а. Полученный результат хорошо согласуется с выводом о применимости магнитоцентрической модели для возбуждения ветра, сделанным в работе [5].

Следует также заметить, что аналогичная зависимость между изменением красного и синего крыла линии гелия He I 5876 у другой Ae-звезды Хербига HD 190073 отмечалась в работе [19] (коэффициент

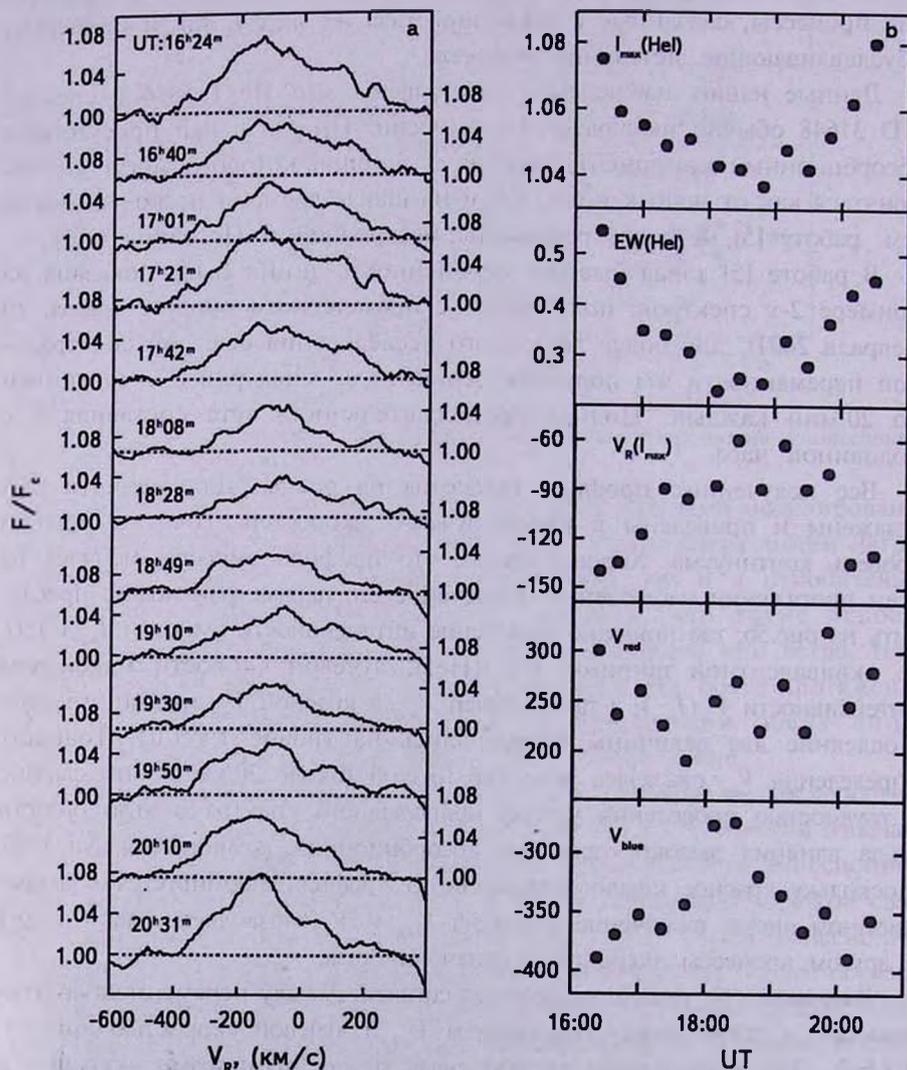


Рис.5. Быстрая переменность линии гелия He I 5876: а) изменение профилей линии (профили сглажены) на шкале времени около 5ч (пунктиром показан уровень континуума); б) изменение интенсивности профиля  $I_{max}$ , эквивалентной ширины  $EW$ , лучевой скорости максимума интенсивности  $V_R(I_{max})$ , синей границы эмиссии  $V_{blue}$  и красной границы эмиссии  $V_{red}$  на той же временной шкале.

корреляции в этом случае оказался еще более высоким).

Таким образом, наблюдаемая переменность может быть связана либо с вращением вокруг звезды истекающей газовой струи, либо с быстрой переменностью параметров самого ветра. Нам представляется более вероятным первое объяснение, поскольку в этом случае время обращения горячей компактной области, в которой формируется He I 5876, вокруг звезды составляет около 6 ч, что хорошо согласуется с результатами

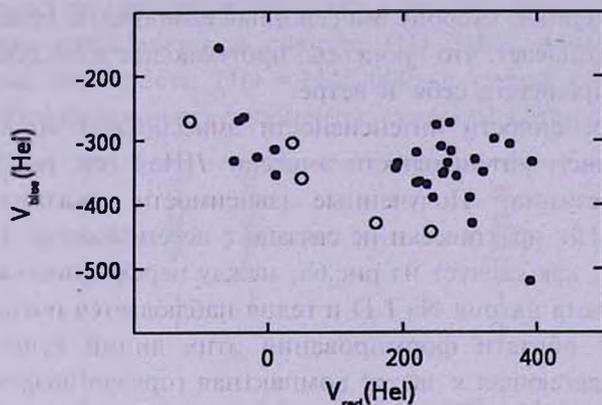


Рис.6а. Связь между изменением интенсивности синей  $V_{blue}$  и красной  $V_{red}$  грани эмиссионной линии гелия He I 5876 по всему ряду наблюдений. Светлыми кружками обозначены данные [10].

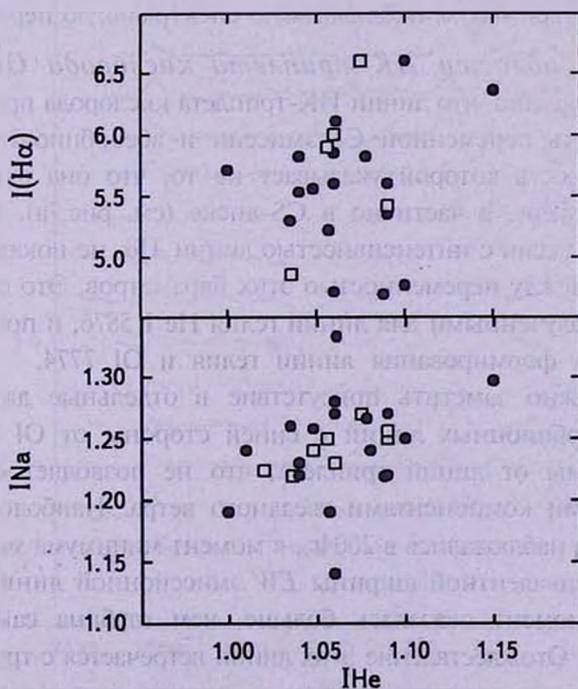


Рис.6б. Связь между изменением интенсивности эмиссии гелия He I 5876 с  $I(H\alpha)$  и  $I(Na)$ . Светлыми квадратами обозначены данные [10].

наблюдения быстрой переменности ИК-триплета OI 7774 (см. [5]).

Наличие связи между аккрецией и истечением отмечается и в работе Бескровной и Погодина [10]. При этом авторы отмечают, что эта связь не постоянна, а наблюдается в отдельные даты. Быстрая переменность гелия по данным [10] характеризовалась некоторыми особенностями. Так, 1 ноября 1996г. авторы наблюдали сильную переменность смещенной в красную сторону абсорбционной части профиля. При этом смещенная в синюю сторону эмиссионная компонента практически не менялась. Это означает, что процессы, протекающие в аккреционном диске, могут не проявлять себя в ветре.

Сравнение переменности интенсивности эмиссионной линии гелия  $I_{\text{em}}(\text{He})$  с изменением интенсивности эмиссии  $I(\text{H}\alpha)$  (см. рис.6b) подтверждает этот результат. Полученные зависимости показывают, что изменение линии  $\text{H}\alpha$  практически не связано с переменностью He I 5876.

В то же время, как следует из рис.6b, между переменностью линий резонансного дублета натрия Na I D и гелия наблюдается очень слабая связь. Поскольку области формирования этих линий существенно различаются (прилегающая к звезде компактная горячая область диска в случае He I 5876 и протяженная область, охватывающая часть аккреционного диска и ветра в случае Na I D), обнаружение даже такой связи между их переменностью свидетельствует о масштабности процессов, ответственных за наблюдаемую спектральную переменность.

*3.5. Линии в области ИК-триплета кислорода OI 7774.* В работе [5] было показано, что линии ИК-триплета кислорода представляют собой совокупность переменной CS-эмиссии и абсорбционной линии, быстрая переменность которой указывает на то, что она формируется частично в фотосфере, а частично в CS-диске (см. рис.7a). Сравнение интенсивности эмиссии с интенсивностью линии  $\text{H}\alpha$  не показало заметной корреляции между переменностью этих параметров. Это согласуется с результатами, полученными для линии гелия He I 5876, и подтверждает близость областей формирования линии гелия и OI 7774.

На рис.7a можно заметить присутствие в отдельные даты слабых переменных абсорбционных линий с синей стороны от OI 7774. Они достаточно удалены от линий триплета, что не позволяет считать их высокоскоростными компонентами звездного ветра. Наиболее сильные линии такого типа наблюдались в 2004г., в момент минимума многолетней переменности эквивалентной ширины  $EW$  эмиссионной линии  $\text{H}\alpha$  (их глубина в этот момент оказалась больше, чем глубина самих линий триплета OI 7774). Отождествление этих линий встречается с трудностями, так как они образуют сложные бленды и, видимо, смещены в синюю сторону (на диск звезды при такой ориентации относительно наблюдателя

могут проецироваться только области ветра).

Характерное время, в течение которого могут наблюдаться эти абсорбции, составляет несколько суток. Позднее на их месте заметны слабые эмиссионные полосы. Сравнение с данными VALD позволяет отождествить эти абсорбции с линиями нейтральных металлов, формирующихся достаточно близко к звезде (на это указывают ширины линий и короткая временная шкала, на которой наблюдается переменность).

Интересное поведение показала и линия калия KI 7699 Å. Обычно эта линия наблюдается в спектре HD 31648 в эмиссии. Однако в минимуме активности (JD = 24453000) с синей стороны появились слабые абсорбционные компоненты, скорости которых составили около

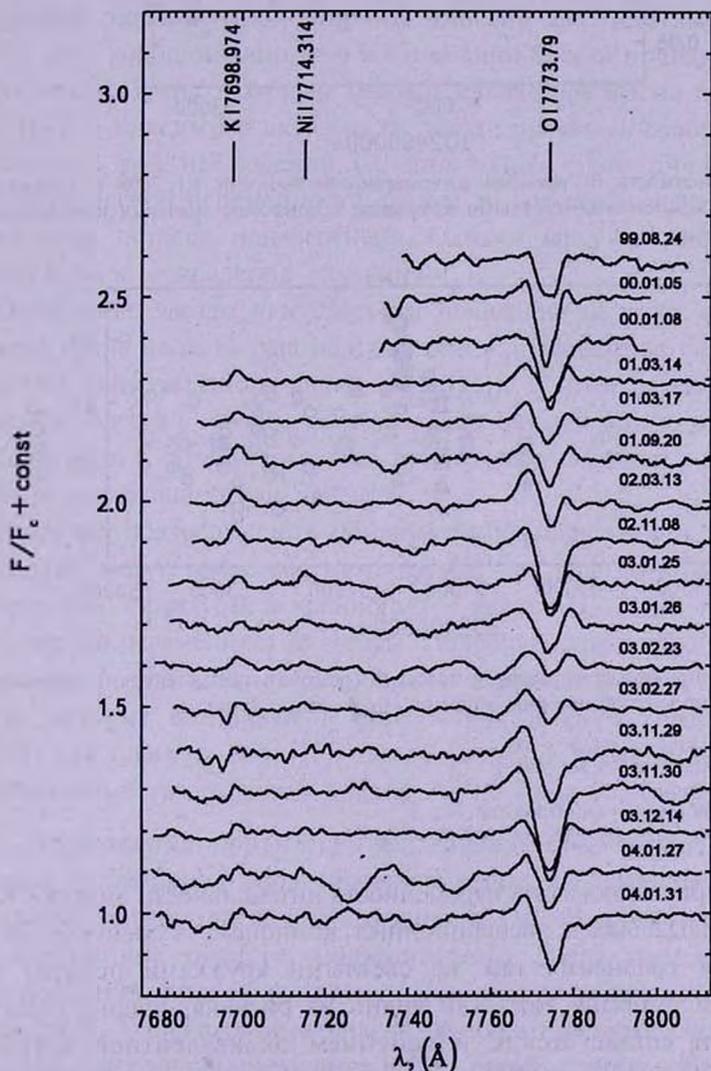


Рис.7а. Наблюдаемые спектры HD 31648 в области линии OI 7774.

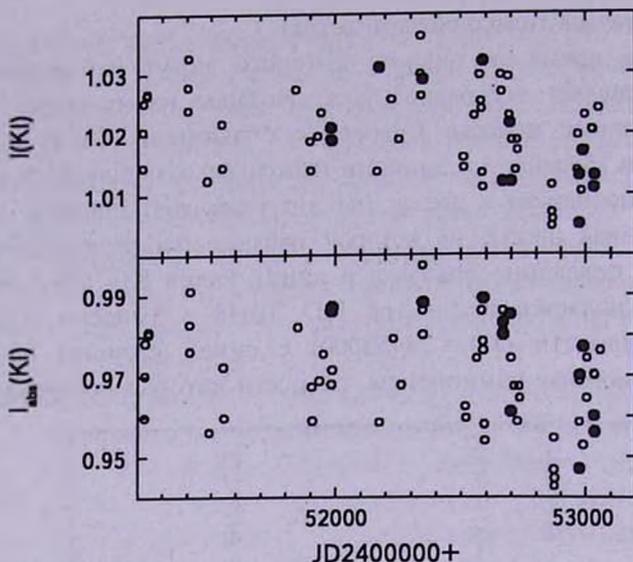


Рис.7б. Зависимость от времени интенсивности эмиссии KI 7698 и глубины ее абсорбционной компоненты (светлыми кружками обозначены значения интенсивности эмиссионной линии  $H\alpha$ ).

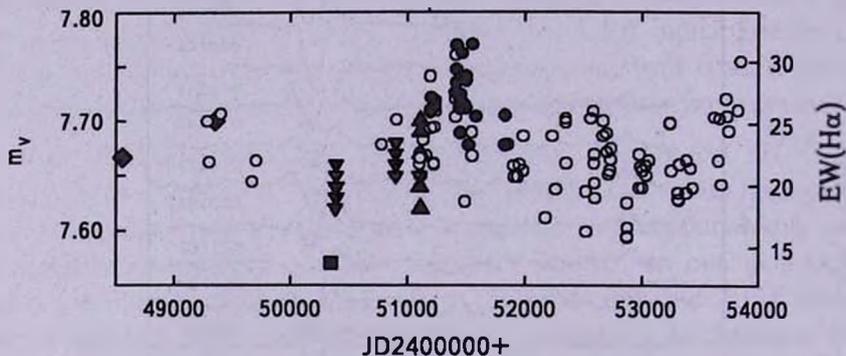


Рис.7с. Изменение блеска звезды в полосе  $V$  (см. обозначения внизу) в сравнении с изменением эквивалентной ширины эмиссии  $H\alpha$  (светлые кружки).

- - Vieira et al., Astron. J., 126, 2971, 2003
- ▲ - Oudmaier et al., A&A, 379, 564, 2001
- - настоящая работа
- ▼ - Beskrovnaya, Pogodin, A&A, 414, 955, 2004
- ◆ - D.De Winter, M.E.Van den Anker et al., A&A, 380, 609, 2001

-200 км/с. На рис.7б показана переменность интенсивности эмиссии KI и глубины наблюдавшихся абсорбционных компонент в зависимости от времени. Для сравнения там же светлыми кружками показан ход интенсивности эмиссии  $H\alpha$ . Как видно из рисунка, общий характер переменности согласуется с изменением эквивалентной ширины  $EW(H\alpha)$ . Можно предположить, что он также повторяет 3-летний

цикл активности, однако для подтверждения этого вывода необходимо получение данных не для одного, а для нескольких циклов.

3.6. *Характер фотометрической переменности.* Изменение блеска HD 31648, как отмечалось выше, не превышает нескольких десятых звездной величины. Нам удалось собрать все доступные в литературе данные о состоянии блеска звезды в полосе  $V$  и объединить их с результатами фотометрической переменности, полученными в КрАО. Они показаны на рис.7с (черные кружки - авторские данные, светлые кружки - данные [10], черные квадраты - [20], ромбы - данные [21], треугольники - [22]). Поскольку одновременных спектральных наблюдений звезды не проводилось, на рис.7 для сравнения показано изменение эквивалентной ширины эмиссии  $H\alpha$  (светлые кружки).

Из него хорошо видно, что в изменении блеска в полосе  $V$  заметен многолетний тренд, который хорошо накладывается на переменность  $EW(H\alpha)$ : в максимуме активности звезда оказалась слабее на  $0^m.2$ . К сожалению, ряд наблюдений охватил только один цикл и характер фотометрической переменности звезды во время последующих циклов активности остался неизвестным. Однако вряд ли можно считать обнаруженное совпадение случайным.

Ослабление звезды указывает на появление на луче зрения пыли, которая могла попасть туда под действием дискового ветра непосредственно из околозвездного диска (см., [23]). В этом случае совпадение минимума блеска с максимумом цикла активности можно рассматривать как аргумент в пользу того, что ветер может выносить пыль из  $CS$ -диска в высокоширотную область.

В случае подтверждения обнаруженной зависимости, полученные результаты могут также рассматриваться, как еще одно свидетельство перестройки структуры аккреционного диска HD 31648 и ее связи с циклической переменностью звезды. Подобная перестройка может быть, например, результатом формирования спиральных волн плотности в диске, которые возникают в присутствии второго компаньона (см., [24,25]) или планеты (см. [26], где обсуждается наблюдаемая структура околозвездных газопылевых дисков  $Ae/Be$ -звезд Хербига).

4. *Внутренняя структура  $CS$  газовой оболочки HD 31648 по данным наблюдений.* Моделирование процессов аккреции и истечения у молодых горячих звезд (см., например, Гудсон и др. [18]) показало, что внутренние области аккреционного диска являются местом формирования дискового ветра. Это подтверждают и результаты наблюдений. Однако разные модели, хорошо описывая общую картину аккреции и истечения, расходятся в том, какова структура околозвездной

оболочки непосредственно вблизи звезды. Например, модель магнитосферной аккреции [15] предполагает, что СS-диск останавливается магнитосферой звезды на расстоянии, равном радиусу коротации. В результате этого ветер формируется не у самой поверхности звезды, а на некотором расстоянии от нее, которое зависит от скорости вращения звезды и величины магнитного поля. Наоборот, магнитоцентробежная модель (см., например, [7]) предполагает, что радиус коротации отсутствует, и аккреционный диск подходит непосредственно к поверхности звезды.

В работе [5] было показано, что для HD 31648 характер истечения вещества лучше всего объясняется в рамках магнитоцентробежной модели ветра. Достигаемые в результате скорости вращения могут превышать скорость убегания на поверхности звезды, а внутренняя область диска становится источником высокоскоростной компоненты дискового ветра.

Полученные недавно в [27] свидетельства существования околос звездного магнитного поля у HD 31648 подтверждают эти результаты (процесс формирования ветра в магнитосферной модели происходит в присутствии магнитного поля диска, а не звезды).

Новые данные, анализируемые в представленной работе, также хорошо согласуются с предположением о применимости магнитоцентробежной модели ветра к HD 31648. К ним можно отнести связь между истечением и аккрецией, наблюдаемую в линии гелия He I 5876, а также ослабление блеска звезды в максимуме активности, связанное с тем, что ветер может захватывать и выносить с собой из диска околос звездную пыль.

В работе [6], по данным переменной эмиссионной линии  $\text{H}\alpha$ , было показано, что ветер у HD 31648 состоит, по меньшей мере, из 2-х компонент, различающихся по скорости истечения. Их существование также хорошо согласуется с предсказаниями магнитоцентробежной модели и связано с тем, что истекающий газ стратифицирован по широте и скорости, в результате чего над диском располагается область ветра с наиболее низкими скоростями истечения, а высокоскоростная компонента ветра связана с более высокими широтами. Новые данные, благодаря использованию других спектральных линий (в первую очередь, линий резонансного дублета натрия Na I D), показали, что число таких компонент значительно больше. Всего нам удалось выделить 4 компоненты, самая низкоскоростная из которых в линии  $\text{H}\alpha$  не видна, так как попадет на область сильного градиента интенсивности, и поэтому влияет только на общую переменность синего эмиссионного крыла.

Структура околос звездного диска в области формирования ветровых компонент также сильно неоднородна. На это указывает переменность на короткой временной шкале, наблюдаемая в линии  $\text{H}\alpha$ , и составляющая несколько дней (см. на рис.2 изменение эквивалентной

ширины и интенсивности эмиссии). Она может быть связана с вращением азимутальных неоднородностей в прилегающей к звезде области диска (согласно результатам [5], эта область является местом формирования высокоскоростной компоненты дискового ветра). Эти области могут затмеваться диском звезды и, таким образом, вызывать наблюдаемую вращательную модуляцию эмиссионной линии  $H\alpha$ .

Нам также удалось подтвердить реальность 3.3-летней циклической активности звезды, обнаруженной в [6]. Она проявляет себя в циклическом усилении и ослаблении параметров как самой интенсивности и эквивалентной ширины эмиссии  $H\alpha$ , так и компонент ветра (в течение цикла активность скорость и плотность ветра постепенно уменьшаются, усиливаясь к началу следующего цикла). Важно отметить, что скачкообразное усиление, а затем ослабление параметров истечения наблюдается у всех компонент ветра.

Кроме переменности на шкале времени 1200 суток мы нашли переменность на более длинной временной шкале. Она выражается в изменении эквивалентной ширины  $EW(H\alpha)$  и синей границы эмиссии  $V_{bluc}(I=1.25)$  линии  $H\alpha$ . Аналогичную переменность показывает и глубина низкоскоростного абсорбционного компонента линий натрия  $I_{\text{на}} I(Na)$ . Это позволяет нам связать данную переменность с изменением параметров наиболее низкоскоростной компоненты ветра.

Анализ других спектральных линий (линия гелия He I 5876, линии резонансного дублета натрия Na I D, линия K I 7698) позволил обнаружить зависимость между характером их переменности. Так была найдена связь между изменением линии  $H\alpha$  и линий резонансного дублета натрия Na I D и калия K I 7698, а также между изменением линий дублета Na I D и эмиссионной линии гелия He I 5876. Поскольку области формирования этих линий могут существенно различаться (как в случае дублета натрия и линии гелия), это позволяет нам предположить, что наблюдаемая спектральная переменность обусловлена не локальными процессами, а связана с изменением структуры всей околозвездной газовой оболочки.

Использование магнитоцентробежной модели позволяет связать скорость истечения ветра с расстоянием до звезды той области аккреционного диска, из которой происходит истечение (наибольшие скорости достигаются в ближайшей к звезде области диска). В этом случае полученные результаты могут служить указанием на перестройку структуры околозвездного диска звезды, как на наиболее вероятную причину наблюдаемой спектральной переменности звезды.

**5. Заключение.** Многолетняя спектральная переменность, наблюдаемая у молодых звезд, связана с процессами, протекающими в

околозвездных газовых оболочках, и отражает их динамику и развитие. Их исследование представляет значительный интерес для понимания природы аккреции и ветра, структуры околозвездных дисков и их эволюции. Как известно, до сих пор подобные задачи с трудом поддаются численному моделированию, за исключением случая, когда молодая звезда представляет собой двойную систему. Поэтому организация многолетнего наблюдательного мониторинга является на данный момент единственной возможностью исследования этого явления.

Данные наблюдений HD 31648 показывают, что структура аккреционного диска и ветра у этой звезды не является стабильной: существуют физические механизмы, обуславливающие изменение внутренней структуры околозвездной газовой оболочки звезды с характерным временем около 3.3 года. Мы полагаем, что среди наиболее вероятных причин такой активности можно назвать влияние маломассивного компонента или планеты-гиганта, формирующейся в относительной близости от звезды. Косвенным аргументом в пользу этой версии является обнаруженная многолетняя переменность в изменении блеска HD 31648 (по данным [22] присутствие маломассивного компаньона может усиливать процесс выноса пыли из аккреционного диска в более высокие широты и, тем самым, вызывать изменения блеска на шкале времени, равной орбитальному периоду).

Близкое время переменности параметров эмиссионной линии  $\text{Na}$  и резонансного дублета натрия показывает и Ae-звезда Хербига CQ Tau (см. [28]). Данные наблюдений показывают, что внутренняя структура аккреционного диска этой звезды меняется на временной шкале, близкой к 1000 суток. Кроме того, по данным [29] у CQ Tau обнаружен 1020<sup>d</sup> фотометрический период. Все это может указывать на сходство физических механизмов, ответственных за обнаруженные изменения.

Авторы выражают искреннюю признательность М.А.Погодину за ценные замечания, сделанные при обсуждении работы, а также Ю.А.Наговицыну за независимое проведение периодограммного анализа наших временных рядов. Работа выполнена при поддержке гранта INTAS 03-51-6311. Исползованные в работе спектры из архива Ritter обсерватории университета Толедо (США) получены при поддержке программы по исследованию и образованию с помощью малых телескопов (PREST) национального научного фонда (National Science Foundation).

Крымская астрофизическая обсерватория, Крым,  
Украина, e-mail: oles@crao.crimea.ua

# THE STRUCTURE OF THE INNER REGIONS OF CIRCUMSTELLAR ENVELOPES AROUND YOUNG HOT STARS. II. THE NEW CYCLE OF SPECTRAL ACTIVITY OF Ae HERBIG STAR HD 31648

O.V.KOZLOVA, I.Yu.ALEKSEEV, D.N.SHAKHOVSKOI

The results of the high-resolution long-term spectral monitoring of the Herbig Ae star HD 31648 in the regions of emission  $H\alpha$  line, Na I D resonance lines and OI 7774 line are presented. We confirmed the conclusion, made in previous papers, that the spectral variability of the star in the region of  $H\alpha$  line have a cyclic character. It is manifested itself as the changing of the equivalent width and intensity of  $H\alpha$  line of the time scale of about 1200<sup>d</sup>. It is shown, that the stellar wind is non-homogeneous and consists of several components, which are differed each other by their velocities. They are observed as in the  $H\alpha$  line as in Na I D resonance lines. The component's parameters are changed during the cycle of stellar activity (in the maximum of activity the velocity and density of the wind are taken the largest values and then they are gradually decreased). The investigation of rapid variability of the He I 5876 line on the time scale of about some hours allow to find the correlation between the variability of the blue and the red wings of the line. It points at the connection between the accretion and the outflows. Such connection, in particularly, is predicted by the modeling the wind from young stars made in the frame of the magneto-centrifugal model, the accordance of which for the HD 31648 was shown in the previous papers. In the present work we confirmed this conclusion on the basis of the new data. We found the weak variability of the stellar brightness (about 0<sup>m</sup>.2), which is agree with the spectral variability (the brightness of the star becomes lower in the maximum of the activity). These changes are well explained by the process of the dust taken from CS disk and carried away by the stellar wind. This process is likely to be more effective in the maximum of activity. The analysis of variability of other spectral lines shows the agreement between the changing of the  $H\alpha$  line, the Na I D resonance doublet lines and KI 7698 line. The weak connection between the He I 5876 and the Na I D lines is also found. Since the formation regions of He I 5876 and Na I D lines are essentially different, we can conclude that the phenomena, responsible for the observed cyclic variability, take place in a spacious region of the CS envelope. We believe that the most plausible reason of found cyclic variability is the reconstruction of the inner structure of the CS gas envelope, caused by the presence around the star a low mass companion or planet.

Key words: *stars:stellar wind - individual:HD 31648*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *О.В.Козлова, Д.Н.Шаховской, А.Н.Ростопчина, И.Ю.Алексеев*, *Астрофизика* **49**, 171, 2006.
2. *В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина*, *Астрон. ж.*, **73**, 194, 1996.
3. *V.Manings, D.W.Koerner, A.I.Sargent*, *Nature*, **388**, 555, 1997.
4. *P.S.The, D. De Winter, M.R.Perez*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **104**, 315, 1994.
5. *О.В.Козлова, В.П.Гринин, Г.А.Чунтонов*, *Астрофизика*, **46**, 265, 2003.
6. *О.В.Козлова*, *Астрофизика*, **49**, 81, 2006.
7. *A.Königl*, in *Disk and Outflows Around Young Stars*, ed. S.Beckwith, 1996.
8. *N.E.Piskunov*, in "Stellar magnetism", ed. V.Yu.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, St. Peterburg, Nauka, p.92, 1992.
9. *F.Kupka, N.E.Piskunov, T.A.Ryabchikova et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **138**, 119, 1999.
10. *N.G.Beskrovnaya, M.A.Pogodin*, *Astron. Astrophys.*, **414**, 955, 2004.
11. *J.Pelt*, "Frequency analysis of astronomical sequences", Tallinn, Valgus publ., pp.1-135, 1980.
12. *Ю.И.Витинский, М.Копецкий, Г.В.Кужлин*, *Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца*, М., Наука, 1986.
13. *G.Gelfreikh, Yu.Nagovitsyn, E.Nagovitsyna*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **58**, 29, 2006.
14. *C.Sorelli, V.P.Grinin, A.Natta*, *Astron. Astrophys.*, **309**, 155, 1996.
15. *A.Natta, V.P.Grinin, L.Tambovtseva*, *Astrophys. J.*, **542**, 421, 2000.
16. *Л.В.Тамбовцева, В.П.Гринин, О.В.Козлова*, *Астрофизика*, **42**, 75, 1999.
17. *F.Shu, J.Najita, E.Ostriker, F.Wilkin*, *Astrophys. J.*, **429**, 781, 1994.
18. *A.P.Goodson, K.H.Böhm, R.M.Wingle*, *Astrophys. J.*, **524**, 142, 1999
19. *M.A.Pogodin, G.A.P.Franco, D.F.Lopes*, *Astron. Astrophys.*, **438**, 239, 2005.
20. *S.L.A.Vieira, W.J.B.Corradi, S.H.P.Alencar et al.*, *Astron. J.*, **126**, 2971, 2003.
21. *D. De Winter, M.E. Van den Anker, A.Maira et al.*, *Astron. Astrophys.*, **380**, 609, 2001.
22. *R.D.Oudmaijer, J.Palacios, C.Eiroa et al.*, *Astron. Astrophys.*, **379**, 564, 2001.
23. *В.П.Гринин, Л.В.Тамбовцева*, *Письма в Астрон. ж.*, **28**, 667.
24. *M.A.Pogodin, A.S.Miroshnichenko, A.E.Tarasov et al.*, *Astron. Astrophys.*, **417**, 715, 2004.
25. *M.A.Pogodin, V.P.Malanushenko, O.V.Kozlova et al.*, *Astron. Astrophys.*, **452**, 551, 2006.
26. *A.C.Quillen, P.Varnierre, I.Minchev et al.*, *Astron. J.*, **129**, 2481, 2005.
27. *S.Hubrig, R.V.Yudin, M.Shöller, M.A.Pogodin*, *Astron. Astrophys.*, **486**, 1089, 2006.
28. *О.В.Козлова, Д.Н.Шаховской, А.Н.Ростопчина, И.Ю.Алексеев*, *Астрофизика*, **50**, 39 2007.
29. *Д.Н.Шаховской, В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина*, *Астрофизика*, **48**, 165, 2005.