АСТРОФИЗИКА

TOM 55

НОЯБРЬ, 2012

выпуск 4

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОКОЛОЗВЕЗДНОЙ ОБОЛОЧКЕ А0e/B9e ЗВЕЗДЫ ХЕРБИГА AB AUR

М.А.ПОГОДИН', О.В.КОЗЛОВА², Н.Г.БЕСКРОВНАЯ¹, Н.Р.ИХСАНОВ¹, Н.З.ИСМАИЛОВ³, О.В.ХАЛИЛОВ³, Р.В.ЮДИН¹ Поступила 7 июня 2012 Принята к печати 12 сентября 2012

Анализ спектров известной Ае/Ве звезды Хербига АВ Аиг, полученных с использованием кудэ-спектрографа высокого разрешения ($R \sim 20000 - 25000$), установленного на 2.6-м телескопе Шайна Крымской АО (Украина) и эшелле-спектрометра среднего разрешения ($R \sim 14000$) на 2-м телескопе Цейсса Шемахинской АО НАН Азербайджана, привел к неожиданному результату. Оказалось, что изменения эквивалентных ширин EW эмиссионных линий HeI 5876 и D Nai показывают обратную корреляцию ($r = -0.67 \pm 0.14$ по данным КрАО и -0.73 ± 0.10 по данным ШАО). При этом для линий На и HeI 5876 эта корреляция прямая ($r = +0.68 \pm 0.14$ по данным КрАО и $+0.59 \pm 0.14$ по данным ШАО). С использованием метода Лафлера-Кинмана был найден период изменения EW этих линий P = 123.7 дня. На фазовых диаграммах, построенных для этого периода, изменения EW носят синусондальный характер, изменения EW(HeI) и EW(DNaI) происходят в противофазе, а EW(HeI) и EW(Ha) - синфазно. Рассмотрена возможная интерпретация Авд. Ама, чтобы подтвердить обнаруженные эффекты на большем статистическом материале.

Ключевые слова: звезды: Ae/Be звезды Хербига – звезды:околозвездная среда:аккреция – объект AB Aur

1. Введение. АВ Aur (MWC 93, B9/A0Ve, V=7[∞].2) является самой яркой из Ae/Be звезд Хербига на северной небесной полусфере. Эти звезды находятся на стадии эволюции до Главной последовательности (PMS-objects) и имеют массы от 2 до, приблизительно, 10 масс Солнца. Их спектральные классы лежат в интервале от F0 до B0 [1,2].

АВ Аш расположена в центре слабой туманности сложной пространственной структуры, содержащей образования типа "арок" и "струй" [1]. В окрестностях АВ Аш наблюдаются и более слабые и маломассивные молодые объекты поздних спектральных классов: SU Aur, UY Aur, Haro 6-39 и др. В работах [3,4] отмечается вероятная связь АВ Аш с Т-ассоциацией Aur T-1, а в [5] - с ассоциацией отражательных туманностей Таu R2.

Спектр AB Aur богат эмиссионными линиями, образующимися в газовой околозвездной оболочке. Наиболее яркими из них являются первые члены бальмеровской серии На и Нβ. Наблюдается также эмиссия в линиях FeII, Call, HeI, NaI и др. [6-9].

Звезда окружена газопылевым аккреционным диском. Во многих работах,

посвященных анализу прямых интерферометрических изображений объекта и его окрестностей в ИК и миллиметровом диапазонах, отмечается, что внешний диск на расстоянии десятков и сотен а.е. имеет сложную пространственную структуру. Он содержит, по меньшей мере, 2 отдельных кольца с различным наклоном плоскости к лучу зрения, соединенных спиралевидной перемычкой [10-12]. Оценка угла наклона оси вращения і к лучу зрения сильно различается в работах разных авторов. В одной из пионерских работ [13] было определено i=78°, в [10,14] - менее 20°. Повидимому, такой разброс связан с тем, что в диске сложной структуры существует пространственная стратификация вещества, распределение которого в проекции на картинную плоскость оказывается различным при наблюдениях на разных длинах волн. Для внутренней части диска оценки угла наклона находятся в лучшем соответствии друг с другом: в [11] - 39° ± 2°, в [12] - 43° ± 7°. в [15] - от 45° до 65°. Судя по типу профилей эмиссионных линий бальмеровской серии в спектре AB Aur, имеющих ярко выраженную Р Суд-структуру, ориентация диска по отношению к лучу зрения должна быть промежуточной [16]. Мы в нашем исследовании будем исходить из предположения, что интервал возможных значений і составляет 40°-60°.

В настоящее время одной из наиболее важных задач является исследование характера взаимодействия аккреционного диска AB Aur со звездой. У менее массивных и более холодных звезд типа T Tauri это взаимодействие хорошо описывается в рамках модели так называемой магнитосферной аккреции (МА-модели) [17]. Напряженность магнитного поля на поверхности этих звезд составляет порядка 10³ Гс. Магнитное поле звезды останавливает приближение аккреционного диска вплотную к ее поверхности. Вследствие этого внутренний радиус диска оказывается ограничен снизу радиусом магнитосферы. На этом радиусе аккреционный поток проникает в магнитное поле звезды и, двигаясь вдоль силовых линий поля, достигает ее поверхности в области магнитных полюсов. Радиус магнитосферы у звезд типа T Tau обычно составляет порядка 5 радиусов звезды.

В случае Ае/Ве звезд Хербига ситуация менее определенная. Звезды ранних спектральных классов не имеют подфотосферных конвективных зон, необходимых для генерации сильного магнитного поля. В ряде работ предлагались сценарии неклассического динамо [18,19]. У более низкотемпературных Ае-звезд Хербига могло сохраниться поле, сформировавшееся у них на более ранней стадии эволюции, когда, согласно теории Паллы и Стайлера [20], они имели более поздние спектральные классы К-G (т.н. звезды типа Т Таи промежуточной массы). О существовании аккреции у Ае-звезд Хербига через газовые потоки, коллимированные полем внутри магнитосферы, упоминается в работах [21-23]. Недавно магнитные поля порядка 10² Гс были измерены спектрополяриметрическим методом у большой выборки Ае-звезд Хербига [24,25]. Это означает, что магнитные поля Ае/Ве звезд Хербига, по-видимому, почти на порядок меньше, чем у звезд типа Т Таи, и, соответственно, радиусы их магнитосфер (если они вообще существуют) при тех же значениях темпа аккреции оказываются существенно меньше (менее 2-х радиусов звезды). Вопрос о применимости классической МА модели к таким звездам до сих пор остается открытым.

Одним из эффективных методов исследования процессов, происходящих в области взаимодействия между звездой и аккреционным диском, является поиск и анализ циклических изменений спектральных параметров, связанных с излучением этой области. В случае AB Aur с промежуточной ориентацией диска по отношению к наблюдателю ситуация осложняется тем, что между наблюдателем и звездой расположена область звездного ветра [16]. Объекты такого типа являются наиболее удобными для изучения процессов, происходящих в самом ветре. В 80-90-е годы был опубликован ряд работ, посвященных исследованию быстрой переменности (часы-дни), наблюдаемой в некоторых эмиссионных линиях в спектрах Ае/Ве звезд Хербига, формирующихся главным образом в ветре [26-30]. В частности, у АВ Анг были обнаружены циклические изменения параметров линий Call (H,K), MgII (h,k), HeI 5876, FeII, На с величиной периода порядка суток. Для Call был получен период $P=32^{h}$ [27], для линии Н $\alpha - P=58^{h}$ [28], а в другую дату для этой же линии - P= 32^b.3 [30]. Подобные циклические изменения интерпретировались авторами этих работ в рамках предположения о вращении в ветре устойчивых азимутальных неоднородностей.

Задачей настоящей работы был поиск циклических изменений в оболочке AB Aur на более долгой временной шкале - порядка нескольких месяцев.

2. Наблюдения. Спектральные наблюдения AB Aur на телескопе ЗТШ-2.6-м Крымской астрофизической обсерватории (Украина) проводились с использованием кудэ-спектрографа ASP-14 и различных ПЗС-систем в качестве приемника излучения. В наиболее ранний сезон 1986-1988гг. была установлена ПЗС-система обсерватории Хельсинки GES+"ССD2000" (Astromed Ltd) [31]. В 2002-2003гг. использовался приемник "SDS9000" Photometric GmbH, а в 2009-2011гг. наблюдения проводились с ПЗС камерой Andor IKOM-L. Спектральное разрешение в спектральной области $\lambda\lambda$ 5800 – 6700ÅÅ составляло $R \sim 20000$ - 25000. Для первичной обработки спектров использовались программы, разработанные в КрАО С.Г.Сергеевым (ССD ROCK, SPE и т.д.).

Для спектроскопических наблюдений AB Aur в Шемахинской астрофизической обсерватории НАН Азербайджана был использован эшелле-спектрометр среднего разрешения (*R*~14000), созданный на базе спектрографа UAGS и расположенный в кассегреновском фокусе 2-м телескопа Цейсса [32]. В качестве приемника излучения использовалась ПЗС матрица (530 x 580 px) с рабочей спектральной областью $\lambda\lambda 4700 - 6700$ ÅÅ. Обработка спектральных данных проводилась по программе Галазутдинова DECH20T [33].

3. Результаты. Как видно из табл.1, в КрАО в 2010-2011гг. было получено 12 спектров АВ Анг в области линий HeI 5876 и дублета D NaI 5889, 5895 и столько же спектров в области линии На в эти же даты.

Таблица 1

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ На, Неі и DNaI ПО ДАННЫМ КрАО В ДАТЫ, КОГДА БЫЛИ ПОЛУЧЕНЫ СПЕКТРЫ В ОБЛАСТИ ВСЕХ ТРЕХ ЛИНИЙ, А ТАКЖЕ ФАЗЫ ПЕРИОДА *P* = 123⁴.7

Дата	ІОлианская дата	EW(Å)			φ
1 - 11 - 17	(JD24 00000.0+)	Ηα	He I	DNa I	$(P=123^{d}.7)$
25.10.2002	52572.422 52572.453	39.0	0.66	0.56	0.58
27.10.2002	52574.300 52574.350	39.0	0.54	0.72	0.60
31.10.2003	52944.447 52944.504	36.9	0.64	0.56	0.59
25.01.2010	55222.358 55222.376 55222.448	30.9 30.2	0.25	0.98	0.94
22.10.2010	55492.430 55492.462	29.0	0.16	1.15	0.18
23.10.2010	55493.462 55493.509	30.8	0.16	1.16	0.18
24.10.2010	55494.431 55494.500	33.0	0.16	1.11	0.19
23.11.2010	55524.384 55524.395	38.0	0.45	0.91	0.43
19.12.2010	55550.415 55550.415	38.8	0.15	0.93	0.64
22.12.2010	55553.380 55553.405	36.2	0.18	0.89	0.67
13.03.2011	55634.231 55634.251	39.0	0.48	1.20	0.32
25.03.2011	55646.300 55646.347	34.0	0.23	0.85	0.42
26.03.2011	55647.280 55647.310	37.0	0.33	0.84	0.43
28.03.2011	55649.311 55649.371	33.7	0.22	0.83	0.45
13.04.2011	55665.230 55665.250	38.0	0.54	0.79	0.57

К ним были добавлены еще 3 спектра, полученные ранее в 2002-2003гг. В таблице, помимо дат наблюдений, приведены эквивалентные ширины EW эмиссионных профилей этих линий, а также фазы периода P=123.7дня, определение которого будет обсуждаться ниже. Эти фазы φ были рассчитаны для начальной даты JD2452500.0. Для дублета D NaI EWвычислялась как суммарная величина для обеих компонент D₁5895 и D₂5889, при этом спектры предварительно очишались от теллурических линий атмосферного пара. Были также убраны узкие межзвездные (*IS*) компоненты, формирующиеся в пространстве между звездой и наблюдателем. Перед измерением EW из спектров вычитался синтетический спектр атмосферы звезды, рассчитанный для модели ($T_{spp} = 10000^{\circ}$ K, log g=3.5, Vsini=85 км/с) с использованием программы SYNTH+ROTATE [34].

В табл.2 приведены те же данные для эмиссионной линии Hα по спектрам, полученным в ночи, когда наблюдения в области HeI + DNaI не проводились (23 даты, начиная с 1986г.). В табл.3 собрана аналогичная

Таблица 2

Дата	Юлианская дата (JD24 00000.0+)	<i>EW</i> (Å) Ηα	$(P=123^{4}.7)$				
20.03.1986	46510.300	30.0	0.61				
07.03.1988	47228.300	26.3	0.41				
16.03.1988	47237.360	34.3	0.49				
01.10.1988	47436.400	32.0	0.09				
02.03.2003	52701.213	33.0	0.63				
04.03.2003	52703.200	32.7	0.64				
11.09.2009	55086.551	30.8	0.89				
12.09.2009	55087.550	30.6	0.90				
22.10.2009	55127.400	33.1	0.22				
24.10.2009	55129.397	34.4	0.23				
24.11.2009	55160.330	28.8	0.49				
24.11.2009	55160.500	28.9	0.49				
25.11.2009	55161.458	31.2	0.50				
26.11.2009	55162.372	30.3	0.51				
30.11.2009	55166.372	29.0	0.54				
05.01.2010	55202.408	32.2	0.83				
20.03.2010	55276.230	36.3	0.42				
21.03.2010	55277.300	35.0	0.43				
18.04.2010	55305.290	33.0	0.66				
23.04.2010	55310.237	33.2	0.70				
05.05.2010	55322.250	31.8	0.79				
23.09.2010	55463.350	25.9	0.94				
21.11.2010	55522.400	35.8	0.41				

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ ЭМИССИОННОЙ ЛИНИИ На ПО ДАННЫМ КрАО В ОСТАЛЬНЫЕ ДАТЫ, А ТАКЖЕ ФАЗЫ ПЕРИОДА *P* = 123^d.7

М.А.ПОГОДИН И ДР.

Таблица 3

то же, что таблица 1, но для данных шао

Лата	ІОлианская дата	1.115	EW()	φ	
	(JD24 00000.0+)	Ηα	He I	DNa I	$(P = 123^{d}.7)$
16.08.2008	54694.513	27.3	0.52	0.75	0.75
17.08.2008	54695.521	27.6	0.52	0.68	0.76
19.08.2008	54697.517	31.9	0.67	0.87	0.77
25.08.2008	55222.358	28.7	0.47	0.84	0.82
24.11.2008	54795.341	34.4	1.03	0.51	0.56
02.12.2008	54803.268	31.5	1.08	0.36	0.62
09.10.2009	55109.462	27.8			0.08
15.10.2009	55120.418	23.6	0.44	0.70	0.17
17.10.2009	55122.390	24.4	0.51	0.59	0.18
25.10.2009	55130.307	26.3	0.40	0.74	0.20
26.12.2009	55192.241	28.9	0.41	0.80	0.76
01.02.2010	55229.220	29.5	0.37	0.75	0.13
10.11.2010	55511.270	25.3	0.45	0.87	0.34
11.11.2010	55512.210	27.2	0.47	0.96	0.35
12.11.2010	55513.240	30.2	0.36	0.94	0.36
13.11.2010	55514.230	30.3	0.54	0.69	0.37
14.11.2010	55515.213	31.0	0.53	0.90	0.38
15.11.2010	55516.218	28.9	0.57	0.97	0.38
16.11.2010	55517.250	26.7	0.47	0.72	0.39
17.11.2010	55518.217	29.7	0.71	0.82	0.40
18.11.2010	55519.223	29.3	0.47	0.81	0.41
20.11.2010	55521.238	31.3	1.00	0.32	0.42

информация о датах, фазах и *EW* линий Hα, HeI и D NaI по данным, полученным в ШАО (22 даты для Hα и 21 дата для HeI + DNaI).

Таким образом, для последующего анализа нами было всего использовано 36 спектров в области HeI и DNaI и 60 спектров в области Hα. Точность единичного измерения *EW* составляла 0.5 - 1.0 Å для Hα и 0.02 - 0.05 Å для HeI и DNaI.

Наиболее интересным результатом анализа спектрального материала оказалась корреляция изменений величин *EW* трех линий H α , HeI 5876 и D NaI. На рис.1 видно, что заметная прямая корреляция между *EW*(H α) и *EW*(HeI) наблюдается как по данным, полученным в KpAO (r=+0.67±0.14), так и по данным ШАО (r=+0.59±0.14). Изменения величин *EW*(DNaI) и *EW*(HeI) показывают обратную корреляцию (r=-0.68±0.141 по данным KpAO и -0.73±0.10 по данным ШАО).

Мы использовали все измеренные величины *EW* этих линий для поиска возможного периода их переменности. Для этого был применен метод пробного периода Лафлера-Кинмана [35]. Этот метод основан на вычислении так называемого Θ -параметра для значений пробного периода

из интервала, в котором предполагается наличие реального периода. Для каждого пробного периода *Р* строится фазовая диаграмма исследуемых



Рис.1. Корреляционные зависимости между изменениями эквивалентных ширин линий Н α , DNaI и HeI: a) по данным КрАО, вверху - $EW(H\alpha)$ и EW(HeI), $r = +0.68 \pm 0.14$; внизу - EW(DNaI) и EW(HeI), $r = -0.67 \pm 0.14$; b) по данным ШАО, вверху- $EW(H\alpha)$ и EW(HeI), $r = +0.59 \pm 0.14$; внизу - EW(DNaI) и EW(HeI), $r = -0.73 \pm 0.10$.

величин m_p $i=1, ..., N. \Theta$ -параметр для этого периода рассчитывается по формуле:

$$\Theta(\widetilde{P}) = \sum_{(l)} (m_l - m_{l+1})^2 / \sum_{(l)} (m_l - \overline{M})^2 , \qquad (1)$$

где

$$\overline{M} = \sum_{i} m_{i} / N$$

Задача сводится к поиску минимума функции $\Theta(P)$. Величина *P*, соответствующая этому минимуму, и будет наиболее близкой к реальному периоду. Данный метод оказывается эффективным для поиска периодов циклической переменности любого характера. В частности, для исследования импульсной активности, когда аппроксимация ряда наблюдаемых величин гармоническими функциями не очень удобна, так как при этом максимум амплитуд отдельных гармоник существенно смещается в сторону более высоких членов разложения. Для периодограммного анализа были сгруппированы 7 отдельных массивов данных. 4 из них относятся к данным, полученным в КрАО: *EW*(Hel) - 15 значений, *EW*(DNaI) - 15 значений, *EW*(H α) - для дат, в которые также проводились наблюдения в Hel + DNaI - 15 значений, и *EW*(H α) для остальных дат - 23 точки. 3 массива были сформированы по данным, полученным в ШАО (*EW*(H α) - 22 даты, *EW*(Hel) и *EW*(DNaI) - 21 дата).

Поиск периода проводился отдельно для каждого из 7 массивов в интервале значений пробного периода от 0 до 500 дней с шагом 0.25 дня. В силу малой статистики каждая из 7 периодограмм имела много минимумовартефактов. Мы искали только такие минимумы, которые присутствовали бы на каждой Θ -периодограмме, так как случайное появление одного и того же ложного периода у всех 7 массивов достаточно маловероятно. В результате



Рис.2. Зависимость Θ -параметра от величины пробного периода в окрестности основного минимума, соответствующего периоду $P = 123.7 \pm 0.3$ суток. Верхняя панель: а) периодограмма, усредненная по трем (для линий На, Неі и DNai, наблюдавшимся в КрАО в одни даты, см. табл.1); b) периодограмма для линии На по данным КрАО из табл.2; c) то же, что а), но для данных ШАО (см. табл.3). Нижняя панель: периодограмма, усредненная по всему массиву данных (60 дат).

было найдено единственное значение *P*=123.66±0.32 дня, удовлетворяющее этому условию, не считая кратных (удвоенного и утроенного) периодов.

В верхней части рис.2 показаны участки 3-х Θ -периодограмм в окрестности обнаруженного минимума, соответствующего P=123.7 дня: а) периодограммы, усредненной по всем 3-м линиям, наблюдавшимся в КрАО в одни и те же даты (см. табл.1) - 15 точек, б) такой же усредненной периодограммы для ланных ШАО - 21 точка (см. табл.3) и в) периодограммы, полученной по $EW(H\alpha)$ для остальных дат наблюдений в КрАО - 23 точки (см. табл.2). В нижней части рисунка приведена периодограмма, усредненная по полному массиву данных (60 независимых дат для H α и 36 - для линий HeI и DNaI).

Рис.3а, b, с иллюстрируют фазовые диаграммы, построенные для $EW(H\alpha)$, EW(HeI) и EW(DNaI) по всем полученным данным для периода $P = 123^{4}.7$ при начальной дате JD2452500.0 (верхняя часть рисунков). В нижней части рисунков приводятся эти же фазовые зависимости, но сглаженные по 3-м



Рис.3а. Фазовые диаграммы для величины $EW(H\alpha)$, построенные для периода $P = 123^{4}$.7. а) светлые кружки – по данным КрАО в даты, когда наблюдения проводились з линиях H α , HeI и DNaI; темные кружки – по данным КрАО, когда наблюдения проводились только в H α , светлые треугольники – по данным ШАО. b) диаграмма по эсему массиву данных, усредненная по 3-м точкам методом медиан.

М.А.ПОГОДИН И ДР.









536

ЗВЕЗДА ХЕРБИГА AB Aur

точкам методом медиан. Большой разброс точек на диаграммах (особенно для линии Hα) связан с многокомпонентной природой наблюдаемой спектральной переменности, на фоне которой исследуемые нами циклические изменения - только одна из компонент. Тем не менее, эта компонента противофазных синусоидальных изменений *EW*(HeI) и *EW*(DNaI), а также синфазных - для линий Hα и HeI достаточно хорошо заметна.

На рис.4 показаны нормированные спектры AB Aur в области линий HeI 5876 и D NaI на двух фазах φ = 0.18 и 0.59 (по данным КрАО), где обнаруженные нами спектральные особенности хорошо видны.



Длина волны (А)

Рис.4. Нормированные спектры AB Aur в области линии Hel5876 и дублета DNaI на двух различных фазах периода P = 123⁴.7: φ = 0.18 и φ = 0.59 (по данным КрАО).

4. Дискуссия. Для того, чтобы перейти к интерпретации найденных нами корреляций между изменениями интенсивностей различных спектральных линий и объяснить их циклический характер, нам надо в первую очередь установить, какова общая структура оболочки AB Aur, и в каких ее областях формируются интересующие нас эмиссионные линии.

Эмиссионная линия HeI формируется в 3-х высокотемпературных зонах: а) на внутренней границе диска, б) в горячих, коллимированных магнитным полем газовых потоках внутри магнитосферы (если она есть) и в) в области падения аккрецируемого газа на поверхность звезды, где происходит основное аккреционное энерговыделение.

В отличие от линии HeI 5876, область образования которой ограничена с внешней стороны границей магнитосферы, эмиссионные линии дублета D Nal в оболочках звезд класса A-B формируются в удаленных, наиболее холодных районах диска и ветра. В работе [36] было также показано, что при высокой плотности газа в диске эти линии могут образовываться и на меньших расстояниях от звезды, достаточно близко к внутреннему радиусу диска.

Областью формирования эмиссионной линии Н α является вся оболочка, куда входит экваториальный диск, магнитосфера и зона ветра на промежуточных широтах. Она включает в себя район, где формируется эмиссия в HeI 5876, поэтому наблюдаемая корреляция $EW(H\alpha)$ и EW(HeI) является достаточно ожидаемым результатом. Более неожиданной оказалась обнаруженная антикорреляция изменений величин EW(HeI) и EW(DNaI), так как излучение в этих линях идет из разных пространственно непересекающихся районов околозвездной оболочки.

Чтобы объяснить это явление, рассмотрим различные факторы. определяющие интенсивность эмиссии в отдельной линии. Как известно, она должна быть пропорциональна величине $SB(1 - e^{-\tau})$, где S - плошаль проекции на картинную плоскость области, излучающей в данной линии. В - функция источников в линии, усредненная по всей области, а т средняя оптическая толщина в данной линии вдоль луча зрения. Величины В и т являются функциями плотности газа N и его электронной температуры Т. С ростом плотности газа т увеличивается. Как показывают расчеты функции источников для отдельных линий (см., например, [37]) в условиях не-ЛТР, характерных для околозвездного газа, величина В также увеличивается с ростом N. Таким образом, можно сказать, что в более плотном газе эмиссия в линиях будет более интенсивной. Но изменения температуры будут оказывать противоположное влияние на эмиссию в линиях Hel 5876 и DNal. Для эмиссии в линии гелия требуется температура, существенно выше 10000 К, нейтральный же натрий при высоких температурах быстро ионизуется, и для заметного излучения в линиях D Nal температура должна быть гораздо ниже 10000 K.

Таким образом, можно выделить два типа явлений, которые могли бы в принципе объяснить наблюдаемую антикорреляцию *EW*(HeI) и *EW*(DNaI), изменения которых носят периодический характер. Это: а) циклическое перераспределение плотности аккрецируемого газа в области внутренней границы диска в направлении на звезду и б) циклические изменения температуры в аккреционном потоке.

Сценарии, описывающие явления первого типа были опубликованы в работах [38,39], где рассматривались модели так называемой осциллирующей магнитосферы. Согласно этим моделям, дисковая аккреция на звезду не является стационарной. Она проходит стадию накопления аккрецируемого газа на границе с магнитосферой, который в какой-то момент преодолевает ее сопротивление, и происходит быстрый сброс вещества на звезлу. Через определенное время система "диск плюс магнитосфера" восстанавливает свою прежнюю структуру, и весь процесс циклически возобновляется. На качественном уровне такая динамическая модель может объяснить наблюдаемую антикорреляцию изменений *EW*(HeI) и *EW*(DNaI), однако для параметров нашей системы временной масштаб циклической активности должен быть существенно меньше, чем это наблюдается. Сценарии, описывающие явления второго типа, основаны на предположении о локальных возмущениях, происходящих в аккреционных дисках (см. [40,41] и процитированную там литературу).

Дальнейшее развитие этой гипотезы требует детального моделирования взаимодействия диска с магнитным полем, которое находится за пределами круга задач, рассматриваемых в нашей статье.

5. Заключение.

1. Анализ 24-х спектров AB Aur, полученных в КрАО в 2010-2011гг. в области линий H α , Hel 5876 и дублета D Nal и, дополнительно, 3-х спектров в области H α и 3-х спектров в области HeI+DNal, взятых из архива Крымской AO и относящихся к более раннему периоду, позволил обнаружить заметную корреляцию изменений эквивалентных ширин (*EW*) эмиссионных линий H α и HeI 5876 с коэффициентом корреляции r== +0.68 ± 0.14 и обратную корреляцию для *EW*(HeI) и *EW*(DNaI) с $r=-0.67 \pm 0.14$. Добавление к этому материалу спектральных данных, полученных для этих же линий в ШАО в 2008-2010гг., позволило получить независимое подтверждение этих корреляций: $r=+0.59 \pm 0.14$ (для EW(H α) и EW(HeI)) и $r=-0.73 \pm 0.10$ (для EW(H α) и EW(HeI)).

2. Периодограммный анализ всех измеренных величин *EW* для полного массива спектральных данных (всего 60 значений *EW* для линии H α и 36 - для HeI и D NaI) по методу Лафлера-Кинмана показал наличие периода $P = 123^{d}.7 \pm 0^{d}.3$. На фазовых диаграммах, построенных для этого периода на фоне большого разброса точек, связанного с многокомпонентной природой спектральной переменности, хорошо заметны изменения *EW*(Hel), которые происходят синфазно с *EW*(H α) и в противофазе с *EW*(DNaI). При этом кривая изменения всех EW напоминает синусоиду.

3. Анализ возможных физических причин противофазной переменности в линиях Hel5876 и дублета DNal показал, что они могут быть интерпретированы в рамках гипотезы о локальном прогреве аккреционного диска вблизи его внутренней границы, связанном с диффузией магнитного поля звезды внутрь диска, сопровождающейся диссипацией магнитной энергии. Сам процесс носит циклический характер, и величина периода магнитной активности оказывается близкой к наблюдаемой при параметре эффективности диффузии α = 0.005.

4. Мы планируем продолжить начатое исследование процесса аккреции

у Ae/Be звезды Хербига AB Aur, первые результаты которого представлены в настоящей работе. В первую очередь предполагается проведение новых программ спектральных наблюдений, которые позволили бы подтвердить на большом статистическом материале наблюдаемые эффекты, которые обсуждались в настоящей статье.

Мы выражаем благодарность С.А.Ламзину за полезную дискуссию. Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН №21, Программы ОФН РАН №17 и Программы "Ведушие научные школы" (грант № НШ-1625.2012). Сотрудники ШАО благодарят также TWAS (грант № 10-118 RG/PHYS/AS-G-UNESCO FR: 3240245998) за помощь в приобретении необходимого оборудования.

- ¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: pogodin@gao.spb.ru
- ² Крымская астрофизическая обсерватория,

Украина, e-mail: oles@crao.crimea.ua или oles_kozlova@mail.ru

³ Шемахинская астрофизическая обсерватория НАН Азербайджана, e-mail: ismailovn@yahoo.com

CYCLIC PHENOMENA IN THE CIRCUMSTELLAR ENVELOPE OF THE HERBIG A0/B9e STAR AB AUR

M.A.POGODIN¹, O.V.KOZLOVA², N.G.BESKROVNAYA¹, N.R.IKHSANOV¹, N.Z.ISMAILOV³, O.V.KHALILOV³, R.V.YUDIN¹

We analyze high and moderate resolution spectra of the well-known Herbig Ae/Be star AB Aur. Observations were made with the coude spectrograph ($R \sim 20000 - 25000$) installed at the 2.6m Shejn telescope of the Crimean Observatory (Ukraine) and with the echelle spectrometer ($R \sim 14000$) at the 2m Zeiss telescope of the Shemakha Observatory (Azerbaijan). Variations of the equivalent widths, EW, of the HeI5876 and DNaI lines have been found to be anti-correlated ($r = -0.67 \pm 0.14$ for CrAO data and -0.73 ± 0.14 for ShAO data), while $EW(H\alpha)$ and EW(HeI) are directly correlated ($r = +0.68 \pm 0.14$ for CrAO data and $+0.59 \pm 0.14$ for ShAO data). The Lafler-Kinman method has revealed the period of cyclic variations $P = 123^4.7 \pm 0^4.3$. In phase diagrams constructed for this period the EW curves look like sinusoids with $EW(H\alpha)$ and the EW(HeI) changing in sin-phase while EW(HeI) and EW(DNaI) - in counterphase. A possible interpretation of the observed phenomena is discussed. We emphasize a necessity to perform new spectral observations of AB Aur in order to confirm the observed effects with a more statistically-rich data set.

Key words: stars: Herbig Ae/Be stars - stars: circumstellar matter: accretion individual (AB Aur)

ЛИТЕРАТУРА

- 1. G.H.Herbig, Astrophys. J. Suppl. Ser., 4, 337, 1960.
- 2. U.Finkenzeller, R.Mundt, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 55, 109, 1984.
- 3. Г.В. Зайцева, Переменные звезды, 17, 294, 1970.
- 4. Н.Л. Магалашвили, Я.И. Кумсишвили, Бюллетень Абастум. Обс., 39, 3, 1970.
- 5. R. Racine, Astron. J., 73, 233, 1968.
- 6. P.W.Merrill, C.J.Burwell, Astrophys. J., 77, 103, 1933.
- 7. P.W.Merrill, C.J.Burwell, Astrophys. J., 98, 153, 1943.
- 8. S. Kleinman, L.V. Kuhi, Publ. Astron. Soc. Pasif., 84, 766, 1972.
- 9. T.Bohm, C.Catala, Astron. Asyrophys., 301, 155, 1995
- 10. J.A.Eisner, B.F.Lane, L.A.Hillenbrand et al., Astrophys. J., 613, 1049, 2004.
- 11. V. Pietu, S. Guilloteau, A. Dutrey, Astron. Astrophys., 443, 945, 2005.
- 12. J. Hashimoto, M. Tamura, T. Muto et al., Astrophys. J., 729, L17, 2011. 13. V. Mannings, A.I. Sargent, Astrophys. J., 490, 792, 1997.
- 14. C.A. Grady, B.E. Woodgate, C.W. Bowers et al., Astrophys. J., 630, 958, 2005.
- 15. W.M.Liu, P.M.Hinz, W.F.Hoffman et al., Astrophys. J., 618, L13, 2005.
- 16. В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина, Астрон. ж., 73, 192, 1996.
- 17. J.Bouvier, S.H.P.Alencar, T.J.Harries et al., in Protostars and Planets V, Univ. Arizona Press, 479, 2007.
- 18. C.A. Tout, J.E. Pringle, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 272, 528, 1995.
- 19. C.A. Tout, J.E. Pringle, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 281, 219, 1996.
- 20. F.Palla, S.W.Stahler, Astrophys. J., 418, 414, 1993.
- 21. J. Muzerolle, P.D'Alessio, N. Calvet et al., Astrophys. J., 617, 406, 2004.
- 22. J.C. Mottram, J.S. Vink, R.D. Oudmaijer et al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 377, 1363, 2007.
- 23. C.A. Grady, K. Humagushi, G. Schneider et al., Astrophys. J., 719, 15656, 2010.
- 24. S. Hubrig, M.A. Pogodin, R.V. Yudin et al., Astron. Astrophys., 463, 1039, 2007.
- 25. G.A. Wade, S. Bagnulo, D. Drouin et al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 376, 1145, 2007.
- 26. F. Praderie, T. Simon, C. Catala et al., Astrophys. J., 303, 311, 1986.
- 27. C. Catala, P. Felenbok, A. Tabalera et al., Astrophys. J., 308, 791, 1986.
- 28. T.Böhm, C.Catala, B.Carter et al., Astron. Astrophys. Suppl. Ser, 120, 431, 1996.
- C.Catala, J.-F.Donati, T.Böhm et al., in Cyclical Variability in Stellar Winds, Springer-Verlag, 361, 1998.
- 30. N.G. Beskrovnaya, M.A. Pogodin, I.D. Najdenov et al., Astron. Astrophys.,

298, 585, 1995.

31. J. Huovelin, M. Poutanen, I. Tuominen, Helsinki Univ. of Tech. Radio Lab. Report, VS166, p.18, 1992.

32. Х.М.Микаилов, В.М.Халилов, И.А.Алекберов, Циркуляр ШАО №109, 2005.

33. Г.А.Галазутдинов, Препринт САО РАН No92, 1992.

34. N.Piskunov, in: Stellar Magnetizm, 92, Nauka, St. Petersburg, 1992.

35. J.Lafler, T.D.Kinman, Astrophys. J. Suppl. Ser., 114, 216, 1965.

36. C.Sorelli, V.P.Grinin, A.Natta et al., Astron. Astrophys., 309, 155, 1996. 37. М.А.Погодии, Астрофизика, 24, 491, 1986.

57. M.A. Hocooun, Actpownsnka, 24, 491, 1980.

38. A.P. Goodson, R.M. Wingle, Astrophys. J., 524, 159, 1999.

39. C.R.D'Angelo, H.C.Spruit, Mon. Notic. Roy. Astron., 406, 1208, 2010.

40. S.H.Lubow, J.E.Pringle, Mon. Notic. Roy. Astron., 402, L6, 2010.

41. G.Lodato, J.E.Pringle, Mon. Notic. Roy. Astron., 381, 1287, 2007.