АСТРОФИЗИКА

ТОМ 50 МАЙ, 2007 ВЫПУСК 2

КРУПНОМАСШТАБНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ Hα И Hβ В СПЕКТРЕ B8e ЗВЕЗДЫ ХЕРБИГА MWC 419 И ЕЕ МОДЕЛЬНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

А.В.КУРЧАКОВ[1], М.А.ПОГОДИН[2], Ф.К.РСПАЕВ[1]

Поступила 12 января 2007
Принята к печати 16 февраля 2007

Представлены результаты спектроскопии звезды B8e Хербига MWC 419 в области линий Hα и Hβ, проведенной с использованием спектрографа умеренного разрешения. Спектральные наблюдения сопровождались фотометрическими широкополосными *BVR* измерениями. Результаты наблюдений показали наличие переменности профилей линий, типичной для Ae/Be звезд Хербига с признаками сильного звездного ветра. Наиболее значительные изменения наблюдаются в области абсорбционной компоненты профилей, превращающие тип профиля из P CygII в P CygIII, а также у интенсивностей центральных эмиссионных компонент. Мы использовали модельный метод для количественной интерпретации этой переменности и показали, что трансформацию абсорбционной компоненты P Cyg профиля можно объяснить в рамках модели звездного ветра, при котором его широтное распределение изменяется на временном масштабе в несколько дней.

Ключевые слова: *звезды: спектры: перенос излучения - объект: MWC419*

1. *Введение*. Be-звезда MWC 419 (BD+61°154, V594Cas, B8e, $V = 10^m.6$) входит в состав молодого скопления NGC225, содержащего T-ассоциации и ряд маломассивных объектов типа T Tauri. В 1960г. она была включена в первый список Ae/Be звезд Хербига [1], которые в настоящее время считаются молодыми объектами промежуточных масс (от 2 до 10 $M_\odot$), находящимися на стадии эволюции до Главной последовательности. Как и все объекты этого типа, MWC 419 имеет избыток в ИК-области спектра, связанный с излучением реликтового газо-пылевого диска [2].

Одной из спектральных особенностей MWC 419 является интенсивная эмиссия в линии Hα [3]. Ее профиль имеет характерную P Cyg-структуру, что является признаком плотного звездного ветра, заполняющего пространство между звездой и наблюдателем. Согласно современным представлениям, эмиссионная область, окружающая Ae/Be звезды Хербига, содержит экваториальный аккреционный диск и область звездного ветра на более высоких широтах. В связи с этим, считается, что объекты со спектральными признаками звездного ветра должны иметь некоторую промежуточную ориентацию своей оси вращения по отношению к

наблюдателю (см. работу Гринина и Ростопчиной [4]).

Еще в начале 80-х годов Финкенцеллер и Мундт [3] обратили внимание на то, что Ae/Be звезды Хербига с P Cyg-профилями бальмеровских линий не распределены равномерно по всей шкале спектральных классов от F0 до B0, а имеют преимущественную концентрацию в области от A2 до B8. Впоследствии эта особенность их распределения подтвердилась на новом наблюдательном материале, что позволило объединить Ae/Be звезды Хербига с P Cyg-профилями линий в особую подгруппу.

В начале 90-х годов одним из авторов настоящей статьи (Погодиным М.А.) была организована программа детального спектроскопического исследования с высоким спектральным разрешением избранных объектов этой подгруппы на крупных телескопах различных обсерваторий: 2.6-м телескоп ЗТШ (КрАО, Украина), 6-м телескоп БТА (САО РАН), 1.4-м телескоп CAT (ESO, Чили), 1.6-м телескоп обсерватории LNA (Бразилия) и т.д. В ряде случаев спектральная программа сопровождалась параллельными фотометрическими и поляриметрическими наблюдениями. Обзор работ, где опубликованы результаты этой программы , приведен в статьях Бескровной и Погодина [5] и Погодина и др. [6]. Наиболее подробная информация была получена для следующих объектов: AB Aur, HD163296, HD50138, HD36112, HD31648 и HD190073. Было показано, что спектральная переменность этих звезд на временном масштабе от месяцев до часов имеет ряд общих особенностей и может быть интерпретирована в рамках моделей, предполагающих глобальные структурные изменения в околозвездной оболочке, а также движение в ней различных видов локальных неоднородностей. Подробное описание этой программы и полученных результатов представлено в докторской диссертации Погодина [7].

Задачей данной работы было получить новый наблюдательный материал и исследовать особенности спектральной переменности еще одной малоисследованной Ae/Be звезды Хербига с признаками звездного ветра - MWC 419, а также сравнить их с результатами, полученными ранее для других объектов этой подгруппы. Была также сделана попытка количественной интерпретации некоторых наблюдающихся явлений с использованием модельного метода.

2. *Наблюдения*. Наблюдения проводились на высокогорной обсерватории Ассы-Тургень Астрофизического института Министерства Образования и Науки Республики Казахстан, где в 2002г. была начата программа спектрального исследования молодых Ae/Be звезд Хербига и звезд типа T Tauri. Для наблюдений был использован спектрограф UAGS, установленный в кассегреновском фокусе 1-м телескопа Цейсса.

Приемник излучения - ПЗС-матрица ST-8Ei (1530 x 1020 пикс) обеспечивал обратную дисперсию спектрограмм 0.5 Å/пикс. Наблюдения проводились в области линий Hα и Hβ. Следует отметить, что профили Hβ в спектре MWC 419 были получены впервые. При характерном времени экспозиции 30^m для этого объекта отношение сигнал/шум на один пиксель на уровне непрерывного спектра было 30-50 (область Hα) и 15-30 (область Hβ). В качестве спектра сравнения использовалась неоновая лампа. Все полученные спектры MWC 419 были приведены к шкале длин волн, связанной со звездой, при этом была использована оценка собственной скорости объекта относительно солнечной системы -44 км/с, полученная Финкенцеллером и Мундтом по положению межзвездных линий красного дублета натрия D NaI [3].

На этом же телескопе на боковой стенке спектрографа (аналог фокуса Нессмита) был установлен фотометр с ПЗС-матрицей ST-7 в качестве приемника излучения, что позволило, параллельно со спектроскопией, проводить *BVR*-фотометрию объектов наблюдений. Фотометрическая привязка осуществлялась с использованием трех звезд сравнения, взятых из каталогов фотометрических стандартов: HD3949 (A0, $V = 7^m.801$), HD3881 (A3, $V = 7^m.451$) [8] и HD5996 (G8, $V = 7^m.670$) [9]. Средняя точность определения фотометрических параметров составляла: $\pm 0^m.007$ (для величины V), $\pm 0^m.010$ (для $B-V$) и $\pm 0^m.009$ (для $V-R$).

Для первичной обработки спектральных и фотометрических данных

Таблица 1

ДАТЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ЛИНИЯХ Hα и Hβ (ЗНАЧОК "+")

Дата	JD (2400000+...)	Hβ	Дата	JD (2400000+...)	Hβ
20.09.01	52173		09.09.02	52527	+
21.09.01	52174		03.10.02	52551	
16.10.01	52199		05.10.02	52553	+
18.10.01	52201		08.10.02	52556	
21.10.01	52204	+	09.10.02	52557	
16.11.01	52230	+	06.11.02	52585	
17.11.01	52231	+	10.11.02	52589	
19.11.01	52233	+	07.12.02	52616	
21.11.01	52235	+	06.01.03	52646	
22.11.01	52236		08.01.03	52648	
11.12.01	52255	+	02.02.03	52673	+
12.12.01	52256		29.08.03	52881	
15.01.02	52290		24.09.03	52907	
07.02.02	52313	+	28.09.03	52911	
08.02.02	52314		30.09.03	52913	
10.02.02	52316	+	19.12.03	52993	
07.09.02	52525	+	20.12.03	52994	
08.09.02	52526		19.01.04	53024	

использовались стандартные программы, разработанные в Астрофизическом институте. Более детальное описание аппаратуры, процедур первичной обработки полученного материала, а также первые результаты программы исследования опубликованы в работах Курчакова и Рспаева [10,11].

Полный перечень дат, когда были получены спектры в области линий Hα и Hβ, представлен в табл.1, а результаты *BVR*-фотометрии приведены в табл.2.

Таблица 2

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В СРАВНЕНИИ С ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШИРИНОЙ ЭМИССИОННОЙ ЛИНИИ Hα

Дата	EW (A)	*V*	*B-V*	*V-R*
07.09.02	69.3	$10^m.53$	$0^m.63$	$0^m.74$
08.09.02	70.3	10.54	0.61	0.76
09.09.02	68.0	10.50	0.67	0.76
03.10.02	83.6	10.66	0.59	0.73
05.10.02	81.6	10.61	0.62	0.72
08.10.02	76.8	10.69	0.60	074
09.10.02	69.8			
06.11.02	82.4	10.60	0.60	0.73
10.11.02	78.9	10.62	0.60	0.72
07.12.02	66.8	10.76	0.59	0.68
06.01.03	67.7	10.80		0.71
08.01.03	57.4	10.46	0.66	0.75
02.02.03	71.7	10.55	0.63	0.75
29.08.03	79.2	10.62		0.64
24.09.03	86.3	10.68	0.59	0.64
28.09.03	75.4	10.66	0.64	0.62
30.09.03	69.0	10.60	0.62	0.66
19.12.03	63.9	10.61	0.62	0.62
20.12.03	66.3	10.67	0.61	0.64
19.01.04	65.6	10.68	0.62	0.64

3. *Результаты наблюдений*. Переменность блеска MWC 419 в полосе *V* и показателей *B-V* и *V-R*, а также эквивалентной ширины эмиссионной линии Hα (*EW*) показаны на рис.1. Изменения фотометрических параметров происходили с небольшой амплитудой ($0^m.4$ у блеска в полосе *V* и порядка $0^m.1$ у показателей цвета). В период с сентября 2002г. по январь 2003г. монотонное ослабление блеска сопровождалось заметным "поголубением" объекта, которое наблюдалось по обоим показателям цвета. Обычно такой эффект наблюдается у переменных типа UX Оп - Ae/Be звезд Хербига, диски которых видны с ребра (см., в частности, работу Гринина и др. [12]). Он связан с тем, что пылевая неоднородность, вращающаяся в плоскости, близкой к

экватору, может закрыть от наблюдателя значительную часть звездного диска и внутренней области оболочки. При этом увеличивается вклад рассеянного излучения околозвездной пыли в общую эмиссию, что и делает показатели цвета более "голубыми". Но такое явление начинает

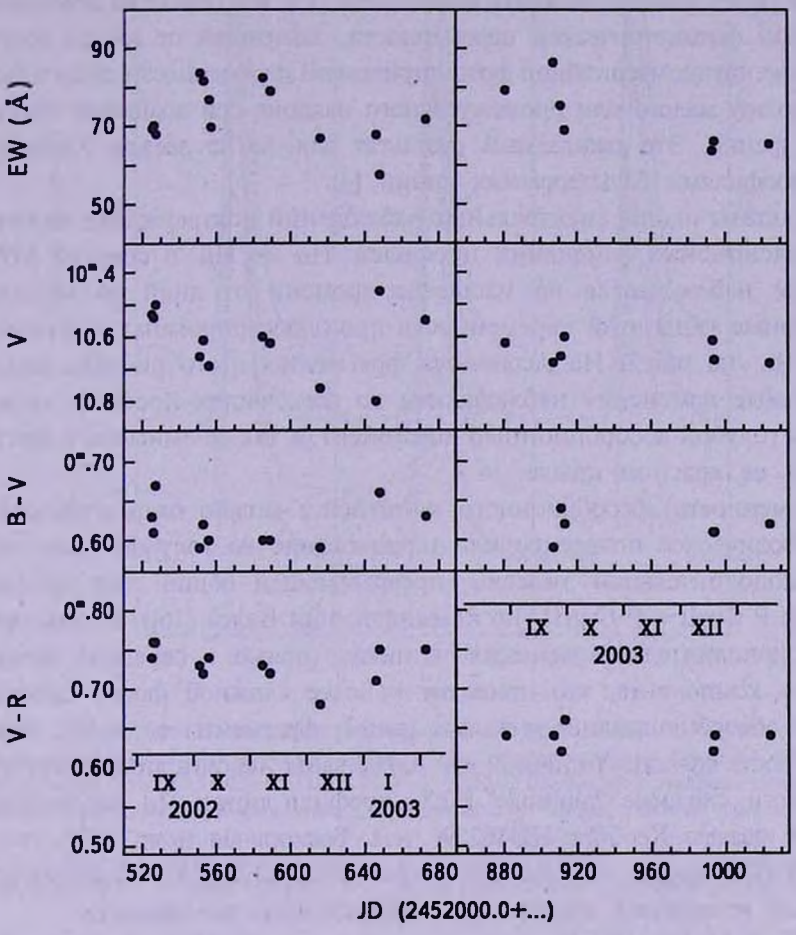

Рис.1. Изменения блеска MWC 419 в полосе V и его показателей цвета $B-V$ и $V-R$ в сравнении с эквивалентной шириной эмиссионной линии Hα (EW).

наблюдаться только при очень сильных ослаблениях блеска. Оно должно также сопровождаться увеличением эквивалентных ширин эмиссионных линий, так как более протяженная газовая оболочка экранируется пылевым облаком в меньшей степени, чем сама звезда (см. Гринин и др. [13]). В случае же MWC 419 все эти явления не наблюдаются. Статистическая значимость обнаруженного нами эффекта слабого "поголубения" невелика (всего 10 и менее измерений), и на данном этапе мы не можем говорить с гарантией о реальности этого эффекта. Результаты наших фотометрических измерений согласуются с резуль-

татами фотометрии MWC 419, проведенной в 80-х годах группой Шевченко на Майданакской обсерватории [14]. Авторы программы характеризуют наблюдаемую переменность, как "мелкомасштабные квазипериодические изменения блеска, на которые накладываются неправильные колебания", а также с более поздним выводом Фернáндеса [15], что объект не показывает регулярной фотометрической переменности, зависящей от длины волны. Отсутствие крупномасштабной фотометрической переменности свидетельствует в пользу малого или промежуточного наклона оси вращения объекта к лучу зрения. Это ожидаемый результат для Ae/Be звезды Хербига с P Cyg-профилями бальмеровских линий [4].

Результаты наших спектральных наблюдений подтверждают наличие крупномасштабных изменений профилей Hα и Hβ в спектре MWC 419. Они наблюдаются на масштабе времени от дней до месяцев. Характерные типы этой переменности проиллюстрированы на примере линии Hα на рис.2. На различных фрагментах этого рисунка видно, что сильные изменения наблюдаются во всех частях профиля линии, включая голубой абсорбционный компонент, а также эмиссию в центре линии и ее красном крыле.

Переменность абсорбционного компенента можно охарактеризовать, как эпизодическое появление или исчезновение на голубом краю этой детали дополнительной эмиссии, превращающей общий тип профиля линии из P CygII в P CygIII (по классификации Билса [16]). В некоторых случаях дополнительная эмиссия возникает прямо в середине абсорбционного компонента, что приводит к более сложной форме профиля с двумя абсорбционными деталями (рис.2, фрагменты a) и b)). Такая переменность является типичной для Ae/Be звезд Хербига этой подгруппы. В частности, сложные "двойные" P Cyg-профили линии Hα наблюдались у A0/A2e звезды Хербига HD163296 (см. Бескровная и др. [17]).

В разное время предлагались три типа моделей, объясняющих подобные изменения профиля абсорбционного компонента:

1. Широтное перераспределение плотности истекающего вещества (Погодин [18]).

2. Движение в пространстве между звездой и наблюдателем плотных вращающихся азимутальных неоднородностей в звездном ветре (Бескровная и др. [19]).

3. Кинематические изменения в области звездного ветра, связанные с образованием в ней зоны твердотельного вращения, обусловленного усилением магнитного поля, управляющего процессом истечения вещества (Михалас и Конти [20], Погодин [21]).

В настоящей работе мы попытались дать количественную интерпретацию некоторым эпизодам наблюдавшейся нами спектральной пере-

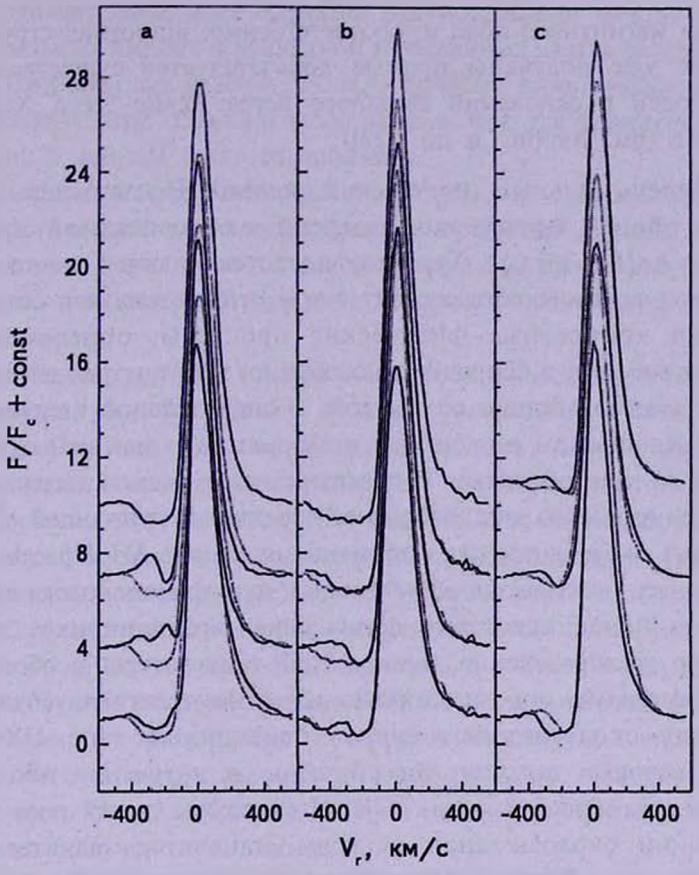

Рис.2. Характерные изменения нормированного профиля линии Hα в спектре MWC 419 на разных масштабах времени. а) Сверху вниз представлены 4 профиля, полученные в следующие даты: 10.11.02; 07.12.02; 06.01.03 и 02.02.03. Первый профиль показан также пунктирными линиями в сравнении с остальными. б) То же, что и на фрагменте (а), но спектры были получены в даты: 3, 5, 8 и 9 октября 2002г. в) 3 пары профилей, наблюдавшиеся в следующие сезоны: 16 и 21 ноября 2001г.; 7 и 10 февраля 2002г.; 19 и 20 декабря 2003г. Первый профиль из каждой пары показан пунктирной линией.

менности MWC 419, основываясь на гипотезе о широтном перераспределении плотности его звездного ветра. Первая попытка подобной интерпретации была предпринята Погодиным [18] в начале 90-х годов для объяснения эпизодических исчезновений P Cyg-структуры у профилей Hα и Hβ в спектре AB Aur, наблюдавшихся в 1988г. Гипотетический процесс изменения плотности ветра на различных широтах связан с предположением о том, что при взаимодействии аккреционного диска и магнитосферы звезды образуется глобальное магнитное поле сложной конфигурации, которое и управляет звездным ветром, ускоряя его вдоль открытых силовых линий и формируя его пространственную структуру. При изменении режима дисковой аккреции может измениться и

конфигурация магнитного поля и, соответственно, широтная структура ветра. Сейчас уже получены прямые доказательства существования магнитных полей в основании звездного ветра Ae/Be звезд Хербига порядка 100Гс (см. Хубриг и др. [22]).

4. *Дифференциальный модельный метод*. В настоящее время построение общей физической модели околозвездной среды, окружающей Ae/Be звезды Хербига, является задачей достаточно трудной. Основная сложность состоит в том, что до сих пор остаются неизвестными конкретные физические процессы, определяющие характер энергообмена в оболочке и, особенно, в ее внутренней части, в области ее взаимодействия со звездой. В значительной степени это обусловлено недостатком имеющейся информации о магнитных полях самой звезды и в ее оболочке. Это ограничивает возможности физического моделирования околозвездной среды, окружающей Ae/Be звезды Хербига и, в частности, применения к ней МГД-расчетов.

В ряде случаев оказывается эффективным путь феноменологического моделирования, когда некоторые физические характеристики, такие, как, например, распределение электронной температуры в оболочке, задаются параметрами модели. Хорошо известна практика успешного моделирования околозвездных дисков переменных типа UXOri - объектов, у которых доминирующий вклад в излучение оболочки дает диск (см., Тамбовцева и др. [23]). Но в случае, когда роль ветра в формировании околозвездной эмиссии становится значительной, задача построения общей модели оболочки продолжает оставаться достаточно сложной. Для полного описания структурных особенностей многокомпонентной оболочки, включающей экваториальный диск и неоднородный по широте ветер, потребуется введение слишком большого числа свободных модельных параметров. Их полный набор будет невозможно однозначно определить при ограниченном количестве информации, получаемой непосредственно из наблюдений.

И все-таки, несмотря на все вышеперечисленные сложности, существует возможность применения модельного метода для количественной интерпретации явлений, происходящих в околозвездной среде даже с очень сложной структурой. Речь идет о так называемом дифференциальном модельном методе, суть которого заключается в том, что моделируется не вся оболочка в целом, а только ее часть, некоторая ограниченная пространственная область (называемая в дальнейшем **"активной областью"**), изменения в которой могут быть ответственны за исследуемую спектральную переменность. Это оказывается возможным, так как высокий градиент скорости крупномасштабных движений, характерный для оболочек Ae/Be звезд Хербига,

обеспечивает локальный характер взаимодействия между излучением в спектральных линиях и веществом в различных частях оболочки (Соболев [24]). При этом для каждой точки на профиле линий можно локализовать пространственную область в околозвездном газе, где формируется излучение в линии в данном месте ее профиля.

Сама процедура моделирования основана на сравнении наблюдаемых и теоретических дифференциальных профилей линий, построенных как разность двух индивидуальных профилей, соответствующих различным датам наблюдений, различие которых и иллюстрирует исследуемую переменность.

Все наши расчеты проводились с использованием компьютерной программы, разработанной и подробно описанной в работах Погодина [25,26]. Свободными параметрами модели, заложенной в основу программы, являются распределения электронной температуры T_e, плотности атомов водорода N и вектора скорости крупномасштабного движения **V** в пространстве, содержащем околозвездный газ. Программа предусматривает вычисление на первом этапе пространственного распределения населенностей водородных атомов на разных энергетических уровнях и функций источников в линиях водорода на основе вероятностного метода Соболева [24]. На следующем этапе производится построение теоретических профилей водородных линий методом численного интегрирования по всему объему оболочки излучения, доходящего до наблюдателя, в соответствии с точными уравнениями переноса излучения в линии.

5. ***Выбор модели "активной области".*** Из всех эпизодов крупномасштабной спектральной переменности, наблюдавшейся у MWC 419 за весь период наблюдений, мы отобрали два: а) превращение Hα и Hβ профилей типа P CygII в P CygIII, при одновременном увеличении центральной эмиссии в линиях (сезон с 16 по 21 ноября 2001 г.) и, б) такое же изменение профилей, наблюдавшееся с 7 по 10 февраля 2002г., но сопровождавшееся уже уменьшением интенсивности в центрах линий. Выбор этих эпизодов был связан с тем, что:

1. В эти даты наблюдения проводились не только в линии Hα, но и в Hβ, что увеличивало вдвое число параметров, получаемых непосредственно из наблюдений.

2. Переменность, наблюдавшаяся в эти даты, носила достаточно однозначный характер, что позволяло применить для ее интерпретации более простую модель (т.е., с меньшим числом модельных параметров).

3. В оба сезона переменность наблюдалась на малых интервалах времени (3-5 дней). Из-за этого было больше оснований считать, что в течение такого короткого времени многие параметры оболочки

оставались неизменными. Это давало также возможность дополнительного упрощения модели.

Непосредственными объектами нашей модельной интерпретации были дифференциальные профили линий Hα и Hβ, построенные для двух сезонов (ноябрь 2001г. и февраль 2002г.) путем вычитания индивидуального профиля, полученного в последнюю дату, из профиля, полученного в начале сезона (см. рис.3, внизу). Нашей задачей было сравнить теоретические и наблюдаемые дифференциальные профили и, изменяя значения параметров модели, добиться их наилучшего согласия прежде всего в области: а) абсорбционных компонент и б) центральных

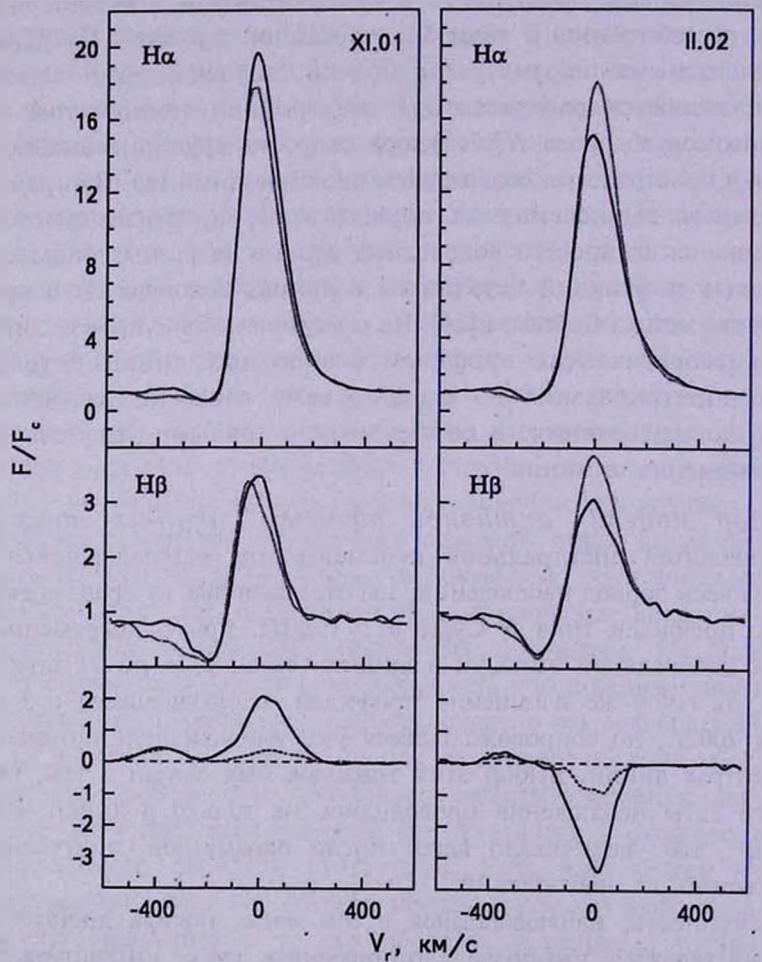

Рис.3. Изменения профилей Hα и Hβ, наблюдавшиеся в спектре MWC 419 с 16 по 21 ноября 2001г. и с 7 по 10 февраля 2002г. Первые профили из каждой пары показаны пунктирными линиями. На нижних фрагментах рисунка представлены дифференциальные профили Hα (сплошные линии) и Hβ (пунктирные линии), построенные для обоих сезонов вычитанием первого профиля из второго и сглаженные с шириной окна в 3 пикселя. Штриховые линии указывают положение нуля на шкале F/F_c.

интенсивностей эмиссионных компонент.

Для того, чтобы правильно выделить активную область оболочки, надо было понять, какие конкретно широтные перераспределения звездного ветра должны произойти, чтобы профили линий типа P CygII преобразовались в P CygIII профиля линии. Расчеты показывают, что если область ветра прижата к экваториальному диску, и пространство между звездой и наблюдателем свободно от плотного истекающего газа, будет наблюдаться простой эмиссионный профиль без признаков P Cyg-структуры. Если зона ветра распространена далеко в область больших широт и занимает всю область на луче зрения между звездой и наблюдателем, то профиль линии будет иметь тип P CygII (см. подробнее в [18]). Для того, чтобы объяснить формирование профиля типа P CygIII, мы должны сделать три следующих предположения: а) внешняя граница зоны ветра увеличивает свое распространение в область высоких широт по мере удаления от звезды (в английской терминологии говорят, что она имеет "flaring"); б) эта граница расположена так, что пространство между звездой и наблюдателем заполнено истекающим веществом только на больших расстояниях от звезды и в) скорость истечения ветра при удалении от звезды вначале растет до некоторого расстояния, пока действует механизм его ускорения, а потом убывает с расстоянием в соответствии с законом Кеплера [7]. Последнее предположение (в) имеет физическое основание, так как одним из главных механизмов ускорения ветра у Ae/Be звезд Хербига в настоящее время признается магнитная центрифуга, эффективность которой уменьшается при удалении от звезды. Из существующих данных наблюдений также следует, что линии, ширина профиля которых определяется полем скоростей, и формирующиеся в удаленной части звездного ветра (например, дублет NaD), имеют меньшую ширину, чем такие линии, как $H\alpha$ и $H\beta$, образующиеся во всей оболочке (см., например, Финкенцеллер и Мундт [3]). При этих вышеперечисленных условиях ветер начнет экранировать звезду от наблюдателя только при достаточном удалении от звезды, когда его скорость уже успеет стать существенно ниже максимальной. Поэтому высокоскоростная часть ветра будет отсутствовать на луче зрения между звездой и наблюдателем, который будет видеть профиль линии типа P Cyg, но с дополнительной эмиссией в области больших отрицательных скоростей (профиль типа P CygIII). Эффект дополнительной эмиссии может также усилиться за счет электронного рассеяния излучения в линии и увеличения эмиссии в крыльях линии при переизлучении в крыльях профиля коэффициента поглощения водородного атома, если электронная плотность в оболочке достаточно велика (см. [26]).

В итоге, для наших модельных расчетов мы выделили локальную

активную область в звездном ветре по следующим признакам:

1. Было принято, что активная область пересекает (по крайней мере, частично) луч зрения и симметрична относительно оси вращения звезды, которая наклонена к лучу зрения под некоторым промежуточным углом i. Для определенности, все наши расчеты были проведены для значения $i = 45°$.

2. Распределение температуры T_e, плотности N и скорости истечения V_r внутри активной области не зависит от широты φ.

3. Внутренние границы активной области (т.е., со стороны низких широт по обе стороны экваториального диска) соответствуют широте φ_1.

4. Внешние границы области "вогнуты", т.е. увеличивает свое положение по широте φ_2 с расстоянием. Зависимость φ_2 от расстояния r переменна во времени, и активная зона может то полностью перекрыть пространство между звездой и наблюдателем, то частично освобождать его.

5. Мы использовали следующие аппроксимационные формулы для радиальной скорости V_r и скорости вращения V_{rot} звездного ветра внутри активной области, который, для простоты, считался истекающим непосредственно из звезды:

$$V_r(r) = V_0 (r/R_0)^{0.5}, \quad \text{если} \quad r \le r_a, \tag{1}$$

$$V_r(r) = V_m (r_a/r)^{0.5}, \quad \text{если} \quad r \ge r_a, \tag{2}$$

где величина $V_m = V_0 (r_a/R_0)^{0.5} = 450$ км/с - определялась по максимальной ширине наблюдаемых эмиссионных профилей линий Hα и Hβ.

$$V_{rot}(r) = U_0 (\rho/R_0), \quad \text{если} \quad r \le r_a, \tag{3}$$

$$V_{rot}(r) = U_m \left(\rho\, r_a/r^2\right), \quad \text{если} \quad r \ge r_a, \tag{4}$$

где ρ - модуль проекции радиус-вектора $\mathbf{r}$ на экваториальную плоскость, $U_m = U_0 (r_a/R_0)$, а $U_0 = 80$ км/с - что было определено из условий $V \sin i = 55$ км/с [27] и $i = 45°$. Параметр r_a характеризует внешнюю границу влияния гипотетического магнитного поля на кинематику ветра.

Распределение плотности атомов водорода рассчитывалось из условия сохранения массы истекающего газа:

$$N(r) = N_0 R_0^2 V_0 \left[r^2 V(r)\right]^{-1} \Phi(r), \tag{5}$$

где $\Phi(r)$ - коэффициент, учитывающий "вогнутость" внешней границы активной области. Он определяется таким образом, чтобы величина $\Phi(r) r^2/R_0^2$ была равна отношению площадей пересечения активной зоны сферами с радиусами соответственно R_0 и r, центры которых совпадают с центром звезды. При отсутствии "вогнутости" внешней границы $\Phi(r) = 1$, если же она присутствует, то $\Phi(r) < 1$.

Для того, чтобы модель была кинематически связная, необходимо также ввести гипотетическую широтную скорость газа $V_\varphi(r)$. Эта скорость направлена вдоль меридиана в сторону увеличения широты и обеспечивает "вогнутость" внешней границы активной зоны.

Существенное упрощение модели удалось сделать при анализе температурной ситуации в околозвездном газе. Проверочные расчеты для изотермических оболочек в диапазоне T_e от 5000 до 20000 K показали, что теоретические профили Hα и Hβ слабо зависят от T_e до тех пор, пока водород остается ионизованным ($N^+/N_1 >> 1$). В тех областях газа, где отношение N^+/N_1 приближается к 1, эмиссия в линиях резко уменьшается. Это обстоятельство позволило нам задать температуру постоянной во всей оболочке ($T_e = 10000$ K) и ввести модельный параметр r_m, как внешнюю границу оболочки, соответствующую расстоянию, где газ уже перестает быть ионизованным.

6. ***Чувствительность теоретических дифференциальных профилей к изменению входных параметров модели.*** Несмотря на то, что выделенная активная область является только ограниченной частью общей оболочки, для ее описания требуется все равно слишком большое количество модельных параметров, чтобы она могла быть использована для однозначных количественных оценок.

Поэтому следующим этапом нашего исследования была попытка сократить число параметров модели, исключив из анализа те параметры, к которым результаты расчетов окажутся малочувствительны.

В качестве теоретического дифференциального профиля рассматривалась разность двух индивидуальных профилей, рассчитанных для двух положений внешней границы активной области: a) луч зрения

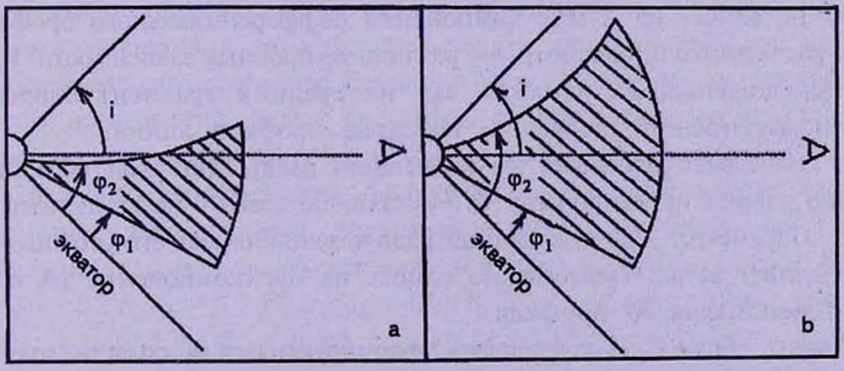

Рис.4. Геометрическая модель активной области, выделенной в звездном ветре в проекции на плоскость, проходящую через ось вращения и луч зрения. На рисунке показан только один из фрагментов проекции, пересекающий луч зрения на пути от звезды до наблюдателя. Представлены варианты для двух случаев: a) внешняя граница активной области пересекает луч зрения и b) истекающий газ внутри активной области заполняет все пространство между звездой и наблюдателем.

пересекает эту границу на расстоянии ρ_0 от центра звезды (см. рис.4а) и б) активная область полностью заполняет пространство между звездой и наблюдателем (рис.4b). Мы также предполагали, что параметр $\Phi(r)$, определяющий закон убывания плотности с расстоянием (5), в обоих случаях остается одним и тем же. Последующий анализ показал, что различные части расчетного дифференциального профиля по-разному чувствительны к параметрам модели. Поэтому мы рассматривали две отдельные компоненты профиля: компоненту А, соответствующую области голубой P Cyg-абсорбции и компоненту Е, формирующуюся в области максимума интенсивности эмиссионного пика.

Серия проведенных нами проверочных расчетов (более 1000 вариантов) привела к следующим результатам:

1. Присутствие в оболочке экваториального диска или звездного ветра вне активной области не влияет ни на одну из двух компонент (А и Е) теоретического дифференциального профиля.

2. Обе компоненты (А и Е) нечувствительны к наличию околозвездного газа в активной области на азимутах в стороне от луча зрения (т.е., не экранирующего звезду от наблюдателя).

3. Обе компоненты (А и Е) нечувствительны к изменению положения внутренней границы области φ_1, при условии, что $\mathrm{tg}\varphi_1 \le 0.5$ и к изменению внешней границы области $\varphi_2(r)$, если $\mathrm{tg}\varphi_2(r) \ge 1.5$.

4. Если внешняя граница области пересекает луч зрения на расстоянии ρ_0 от центра звезды, то компонента А оказывается чувствительной только к величине ρ_0. Вторая компонента Е сильно зависит от формы внешней границы, так как зависимость $\varphi(r)$ определяет характер убывания плотности $N(r)$ с расстоянием согласно закону сохранения массы (5).

5. Введение в кинематику ветра дополнительной широтной скорости $V_\varphi(r)$ не влияет на А и Е компоненты дифференциального профиля. При расчетах были рассмотрены различные пробные зависимости $V_\varphi(r)$ и исследовалось их влияние как на средний градиент скорости крупномасштабного движения, так и на профили линий.

6. Начальная плотность N_0 и внешний радиус активной области r_m сильно влияют на компоненту Е и достаточно слабо - на компоненту А.

7. Параметр r_a, определяющий радиус влияния магнитного поля на кинематику ветра, существенно влияет на обе компоненты (А и Е) дифференциального профиля.

Таким образом, А-компонента, формирующаяся в области голубой P Cyg-абсорбции, зависит только от двух параметров модели: ρ_0 и r_a. Это означает, что мы вполне можем применить модельный метод для определения этих параметров в наблюдаемом звездном ветре. Компонента Е, соответствующая области эмиссионного максимума профиля линии,

зависит от темпа истечения газа в активной области, от пространственного распределения его плотности и от внешнего радиуса области, т.е., от параметров N_o, r_m, $\varphi_2(r)$ и r_a.

Так как их число слишком велико, мы не можем использовать компоненту E для однозначной количественной интерпретации результатов наблюдений.

7. Модельная интерпретация дифференциальных профилей в области голубой P Cyg-абсорбции. Как уже было отмечено в предыдущем разделе, дифференциальные профили линий Hα и Hβ в области P Cyg-абсорбции (т.н., A-компонента) могут быть достаточно полно описаны только двумя модельными параметрами ρ_o и r_a. Поэтому для моделирования этих компонент было достаточно использовать упрощенную модель активной области с ограниченным числом входных параметров, причем некоторые из них задавались произвольно.

Рис.5 иллюстрирует семейства теоретических A-компонент, рассчитанных с использованием модели, где предполагалось, что: а) $\mathrm{tg}\varphi_1 = 0.2$, б) $\Phi(r) = 1$ для всех r, и в) форма внешней широтной границы активной области φ_2 описывалась простым линейным уравнением (6).

$$\mathrm{tg}\varphi_2 = 0.4[1 + 0.2\,a_1(r/R_o)]. \qquad (6)$$

Параметр a_1 в выражении (6) характеризует степень искривленности внешней широтной границы. Он однозначно связан с параметром ρ_o: когда $r = \rho_o$, соответствующая ему величина a_1 обеспечивает равенство $\mathrm{tg}\varphi_2 = 1$.

Семейства теоретических A-компонент, приведенные на рис.5, были рассчитаны для набора значений параметра $r_a = R_o$, $2R_o$ и $3R_o$ и параметра $a_1 = 1$, 2, 3 и 4. При этом сами дифференциальные профили строились, как разность индивидуальных Hα и Hβ профилей, рассчитанных для данного значения a_1 и индивидуального профиля этих же линий, характеризующего состояние активной области при полном заполнении ветром пространства между звездой и наблюдателем, но с такой же зависимостью параметра $\Phi(r)$ от расстояния r (см. рис.4b).

Сравнение теоретических A-профилей с наблюдаемыми показало, что наилучшее согласие достигается при следующих значениях модельных параметров: а) для спектров, полученных в ноябре 2001г.: $r_a = 2.8 \pm 0.2\,R_o$, $a_1 = 1.7 \pm 0.3$ ($\rho_o = 4.4 \pm 0.7\,R_o$); б) для сезона в феврале 2002г.: $r_a = 2.2 \pm 0.1\,R_o$, $a_1 = 3.5 \pm 0.5$ ($\rho_o = 2.1 \pm 0.3\,R_o$). Наблюдаемые A-профили линий Hα и Hβ, полученные в оба наблюдательных сезона, также приведены на рис.5 в сравнении с теоретическими.

8. Оценка темпа истечения масс в активной зоне звездного ветра. Результаты исследования чувствительности теоретических

дифференциальных профилей к различным параметрам используемой модели показали, что компонента E, характеризующая изменения центральной интенсивности индивидуальных профилей в области максимума эмиссии, находится в сильной зависимости от параметров r_a, $\varphi_2(r)$, N_0 и r_m (см. раздел 5). Величина r_m была достаточно однозначно определена по A-компонентам дифференциальных профилей Hα и Hβ, наблюдавшихся в спектре MWC 419 в ноябре 2001г. и феврале 2002г. (см. раздел 6).

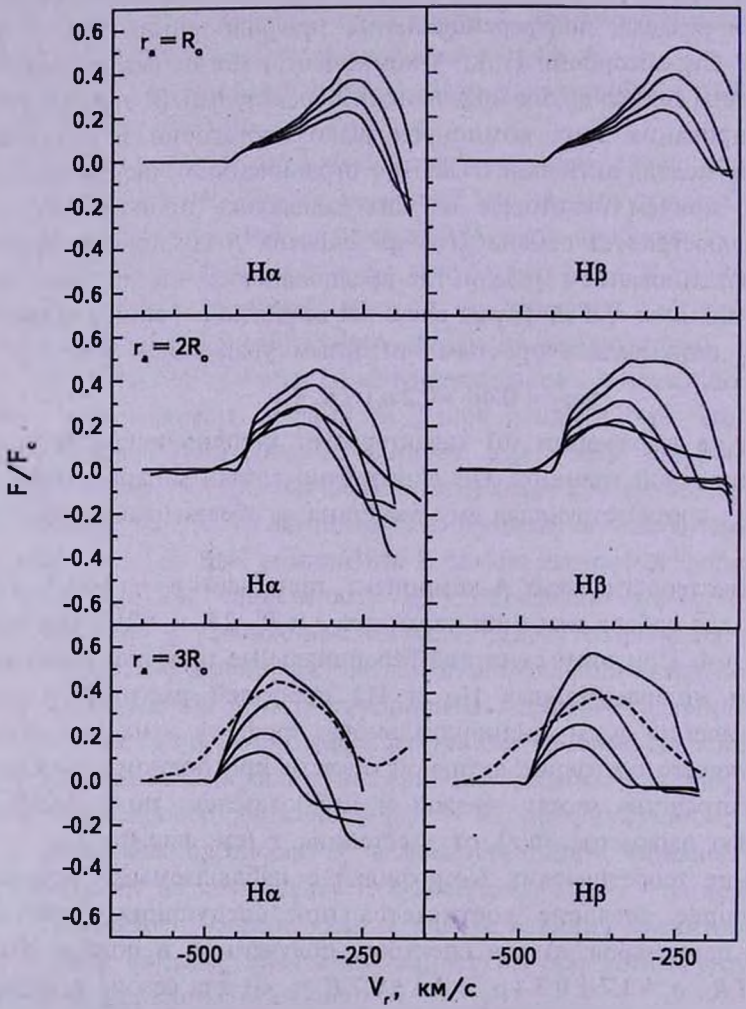

Рис.5. Семейства теоретических дифференциальных профилей линий Hα и Hβ в области абсорбционного P Cyg-компонента, построенных для значений $r_a = R_o$, $2R_o$ и $3R_o$ и $a_1 = 1$, 2, 3 и 4 (сверху вниз на каждом фрагменте рисунка). В качестве вычитаемого профиля использовался профиль, соответствующий случаю полного заполнения звездным ветром пространства между звездой и наблюдателем. Для сравнения приведены наблюдаемые дифференциальные профили: жирные штриховые линии - для сезона в ноябре 2001г. и жирные сплошные линии - для сезона в феврале 2002г.

О точной зависимости $\varphi_2(r)$ мы имеем довольно мало информации. В предыдущем разделе были сделаны только оценки, на каком расстоянии от звезды внешняя широтная граница активной области должна пересекать луч зрения (параметр ρ_o). Но остаются неизвестными конкретные физические процессы, способствующие "растягиванию" по широте активной зоны ветра при удалении от звезды. Именно незнание точного характера распределения широтной скорости $V_\varphi(r)$, а, следовательно, и φ_2, является основным препятствием к однозначной интерпретации наблюдаемых E-компонент линий Hα и Hβ в спектре объекта.

Тем не менее, мы попытались исследовать два принципиальных вопроса:

1. Достаточно ли изменений параметров ветра только внутри активной зоны, чтобы объяснить наблюдаемую переменность профилей линий Hα и Hβ в области эмиссионных максимумов их профилей.

2. Какой темп потери массы может ожидаться внутри активной зоны, и каковы могут быть его изменения на временном масштабе исследуемой спектральной переменности (несколько дней).

Наши пробные расчеты были проведены в несколько этапов, при этом были проанализированы результаты, полученные для различных типов зависимости $\varphi_2(r)$.

В итоге было установлено, что:

1. Переменность центральных интенсивностей профилей Hα и Hβ, наблюдавшаяся в спектре MWC 419 как в ноябре 2001г., так и в феврале 2002г., может быть объяснена в рамках рассмотренной выше модели активной области звездного ветра, если: а) $\varphi_1 \le 0.1$; б) величина φ_2 увеличивается с расстоянием не быстрее, чем предполагает линейный закон (6). При несоблюдении этих условий теоретические центральные интенсивности эмиссионных профилей оказываются систематически ниже наблюдаемых, что делает невозможной модельную интерпретацию результатов наблюдений.

2. Модельная интерпретация наблюдаемых E-компонент Hα и Hβ профилей при выполнении условий, указанных в разделе 1, позволяет сделать следующие оценки:

а) $N_o \sim 10^{12}$ см$^{-3}$; б) изменения N_o на временном масштабе в несколько дней составляют от 30 до 50% от начального значения; в) значения параметра r_m варьируются от 12 до 22 R_o. Характерные примеры теоретических дифференциальных профилей в сравнении с наблюдаемыми (см. рис.3, нижний фрагмент) приведены на рис.6. В этих моделях предполагается постоянство параметра r_m, а переменность происходит за счет изменения начальной плотности звездного ветра N_o. Зависимость $\Phi(r)$ задавалась в соответствии с формулой (6).

3. Геометрия и кинематика активной области, а также сделанная выше оценка N_o позволяют оценить также темп истечения вещества внутри активной области порядка $10^{-7} M_\odot$ в год и его изменений в течение нескольких суток порядка $3 + 5 \cdot 10^{-8} M_\odot$ в год.

Но нельзя также исключать вариант, что активная область не такая протяженная по широте ($tg\varphi_1 > 0.1$), увеличение φ_2 с расстоянием более быстрое, чем предполагает закон (6), и начальная плотность $N_o < 10^{12}$ см$^{-3}$. В этом случае следует признать, что для объяснения наблюдаемой переменности максимальных интенсивностей эмиссионных линий Hα и Hβ в спектре MWC 419 требуется дополнительно учитывать

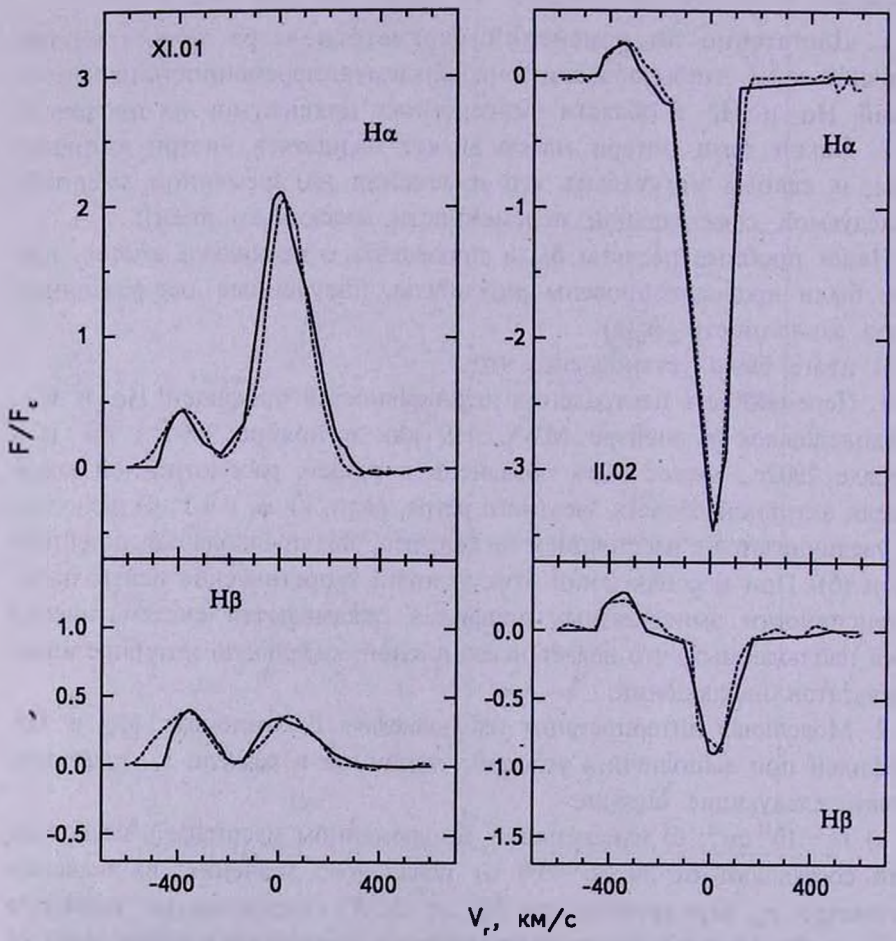

Рис.6. Теоретические дифференциальные профили линий Hα и Hβ, рассчитанные для каждого сезона наблюдений (XI.01) и (II.02). Штриховыми линиями для сравнения показаны наблюдаемые дифференциальные профили (см. рис.3, внизу). При расчете были использованы следующие наборы параметров модели: $r_* = 12R_o$, начальная плотность $N_o = 1.3 \cdot 10^{12}$ см$^{-3}$, конечная плотность $N_o = 2.5 \cdot 10^{12}$ см$^{-3}$ (ноябрь 2001г.); $r_* = 12R_o$, начальная плотность $N_o = 2.8 \cdot 10^{12}$ см$^{-3}$, конечная плотность $N_o = 4.0 \cdot 10^{12}$ см$^{-3}$ (февраль 2002). Зависимость $\Phi(r)$ была задана в соответствии с формулой (6).

явления, происходящие за пределами выделенной активной области звездного ветра.

9. *Заключение*. Результаты нашей спектроскопии показали, что в спектре B8e звезды Хербига MWC 419 наблюдается переменность профилей линий Hα и Hβ, типичная для Ae/Be звезд Хербига с P Cyg-профилями линий. Основные типы их переменности - это трансформация профилей из типа P CygII в P CygIII и обратно, а также изменение интенсивности общей эмиссии в линии. В некоторых случаях P Cyg-профили приобретают более сложный вид с двумя абсорбционными голубыми компонентами. Эквивалентные ширины эмиссионных бальмеровских линий в спектре этого объекта аномально велики по сравнению с другими звездами этой подгруппы. Согласно работе Бёма и Каталы [27], масса объекта составляет $5.2\,M_{\odot}$, а его температура $T_{eff} = 11300$ K. По эволюционной схеме Паллы и Стайлера [28] эта звезда должна быть очень молодой и находиться практически на "линии рождения". В будущем, перед выходом на Главную последовательность ее температура должна повыситься до 16000-17000 K, и она станет ранней Be-звездой. Такие молодые объекты, как MWC 419, должны обладать особенно массивными и протяженными оболочками, это и может быть причиной сильной эмиссии в линиях его спектра.

Результаты наших фотометрических измерений подтвердили промежуточный угол наклона оси вращения объекта к лучу зрения и согласуются с результатами более ранних наблюдений других авторов.

Количественная интерпретация изменений Hα и Hβ профилей в спектре MWC 419, а именно, превращения их в течение нескольких дней из P CygII в P CygIII, сопровождаемого изменением общей интенсивности линий, была проведена с использованием дифференциального модельного метода для двух наблюдательных сезонов в ноябре 2001г. и феврале 2002г. Она показала, что наблюдаемая переменность может быть объяснена широтным перераспределением плотности истекающего вещества с общим изменением начальной плотности в его основании. В активной области величина начальной плотности газа в основании ветра может достигать 10^{12} см$^{-3}$ и изменяться за несколько дней почти вдвое (если принять величину внешнего радиуса оболочки r_m в $12R_{\odot}$ и на 20-30% (r_m порядка $20R_{\odot}$).

Оценка темпа истечения вещества в активной области показала, что темп истечения может быть $10^{-7}\,M_{\odot}$ в год, а его изменение в течение нескольких дней - $3 \div 5 \cdot 10^{-8}\,M_{\odot}$ в год. Согласно [29], для переменных типа UX Ori - молодых звезд с массой порядка $2.5\,M_{\odot}$ и по возрасту приближающихся к Главной последовательности, модели дискового ветра предсказывают общий темп потери массы порядка $10^{-8}\,M_{\odot}$ в год.

Учитывая, что MWC 419 является гораздо более массивной и молодой звездой, только недавно ушедшей с "линии рождения", ее звездный ветер может быть гораздо более интенсивным. Поэтому наша оценка величины темпа истечения массы для активной области, выделенной в звездном ветре MWC 419, является вполне правдоподобной.

Расчеты показывают, что магнитное поле может управлять кинематикой околозвездного газа и быть одним из основных механизмов ускорения звездного ветра в области, границы которой простираются на 1-2R_* от поверхности звезды. Из условия равенства плотности магнитной и кинетической энергии на границе этой зоны, можно оценить необходимую для этого напряженность магнитного поля от 70 до 150 Гс. Эта оценка полностью соответствует результатам прямых измерений магнитного поля в основании ветра у ряда Ae/Be звезд Хербига, выполненных в работе Хубриг и др. [22]. В работе Погодина [18] было показано, что при характерных скоростях истечения в звездном ветре Ae/Be звезд Хербига (400-500 км/с), полное формирование зоны звездного ветра после широтного перераспределения его плотности в области его основания, может произойти в течение одних суток. Такой временной масштаб находится в соответствии с характерным временем наблюдаемой нами спектральной переменности.

В нашем исследовании мы использовали заведомо упрощенные модели. Реально, при широтном перераспределении плотности истекающего вещества, связанного с изменением структуры магнитного поля, следует ожидать переменности не только плотности ветра, но и параметра r_a, являющегося индикатором эффективности влияния поля на параметры ветра. Но для разработки более детальной модели требуется получение дополнительной наблюдательной информации.

Хотелось бы подчеркнуть, что результаты, представленные в нашей статье, являются одним из возможных вариантов интерпретации спектральной переменности, наблюдаемой у MWC 419. Несмотря на упрощенность используемой нами модели, многие полученные нами результаты оказываются достаточно универсальными. Так, например, слабая зависимость дифференциальных теоретических профилей Hα и Hβ в области P Cyg-абсорбции от общей геометрической структуры области ветра (за исключением места пересечения ее лучом зрения), делают применимыми наши оценки параметров r_a и ρ_0 к модели ветра, истекающего не из самой звезды, а из околозвездного диска. Будущие исследования этого интересного объекта дадут возможность проверить правильность предложенной нами модели, а также рассмотреть альтернативные варианты модельной интерпретации.

Организация поляриметрической программы наблюдений позволила

бы исследовать ожидаемую азимутальную неоднородность ветра и формирование в нем плотных струй. На стадиях ранней эволюции объекта до Главной последовательности уровень активности в околозвездной среде должен быть особенно высоким. Желательно было бы также проведение детального спектроскопического исследования этого объекта с высоким спектральным разрешением и в более широком диапазоне длин волн.

Авторы выражают благодарность В.П.Гринину, С.А.Ламзину и А.Ф.Холтыгину за полезные замечания, сделанные ими при обсуждении дифференциального модельного метода.

[1] Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова, Алматы, Казахстан, e-mail: anatol@aphi.kz
[2] Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулково, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: pogodin@gao.spb.ru

LARGE-SCALED VARIABILITY OF THE Hα AND Hβ PROFILES IN THE SPECTRUM OF THE B8e HERBIG STAR MWC 419 AND ITS MODEL INTERPRETATION

A.V.KURCHAKOV[1], M.A.POGODIN[2], F.K.RSPAEV[1]

The results of spectral middle-resolution observations of the B8e Herbig star MWC 419 near the Hα and Hβ lines are presented. The spectroscopic programme was followed by photometric broad-band *BVR* measurements. The observations have shown that the object demonstrates the line profile variability typical for Herbig Ae/Be stars with signatures of a strong stellar wind. The most remarkable changes are observed in the blueshifted absorption component of the Hα and Hβ lines transforming the profile type from P CygII to P CygIII as well as in the intensity of their central emission. We have used the model method to carry out the quantitative interpretation of this variability and have shown that the P Cyg-type profile transformation can be explained in the framework of a model where the latitudinal distribution of the stellar wind is variable on the timescale of several days.

Key words: *stars: spectra: radiative transfer - individual: MWC 419*

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.H.Herbig*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **4**, 337, 1960.
2. *L.A.Hillenbrand, S.E.Strom, F.J.Vrba, J.Keene*, Astrophys. J., **397**, 613, 1992.
3. *U.Finkenzeller, R.Mundt*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **55**, 108, 1984.
4. *В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина*, Астрон. ж., **73**, 194, 1996.
5. *N.G.Beskrovnaya, M.A.Pogodin*, Astron. Astrophys., **414**, 955, 2004.
6. *M.A.Pogodin, G.A.P.Franco, D.F.Lopes*, Astron. Astrophys., **438**, 239, 2005.
7. *М.А.Погодин*, Ae/Be звезды Хербига: спектроскопия высокого разрешения и структурно-кинематические особенности оболочек, докт. дисс., Спб., 2001.
8. *В.Г.Корнилов, А.В.Миронов*, Труды ГАИШ, **63**, 400, 1991.
9. *J.R.Ducati*, Catalogue of stellar photometry in Jonsin's 11 colour system, Dep. of astronomy, University of Wisconsin, 2002.
10. *А.В.Курчаков, Ф.К.Рспаев*, Известия МОНРК, **2(224)**, 31, 2002.
11. *А.В.Курчаков, Ф.К.Рспаев*, Известия МОНРК, **4(236)**, 32, 2004.
12. *V.P.Grinin, N.N.Kiselev, N.H.Minikulov*, Astrophys. Space Sci., **186**, 283, 1991.
13. *V.P.Grinin, P.S.Thé, D. de Winter et al.*, Astron. Astrophys, **292**, 165, 1994.
14. *В.С.Шевченко*, Ae/Be звезды Хербига, изд-во "ФАН", Ташкент, 51, 1989.
15. *M.Fernández*, ASP Conf.Ser., **62**, 51, 1994.
16. *C.S.Beals*, Publ. Dom. Astron. Observ., **9**, 1, 1951.
17. *N.G.Beskrovnaya, M.A.Pogodin, R.V.Yudin et al.*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **127**, 243, 1998.
18. *М.А.Погодин*, Письма в Астрон. ж., **18**, 1066, 1992.
19. *N.G.Beskrovnaya, M.A.Pogodin, I.D.Najdenov, I.I.Romanyuk*, Astron. Astrophys., **298**, 585, 1995.
20. *D.Mihalas, P.S.Conti*, Astrophys. J., **235**, 515, 1980.
21. *М.А.Погодин*, Астрофизика, **32**, 371, 1990.
22. *S.Hubrig, R.V.Yudin, M.S.Shöller, M.A.Pogodin*, Astron. Astrophys., **446**, 1089, 2006.
23. *Л.В.Тамбовцева, В.П.Гринин, О.В.Козлова*, Астрофизика, **42**, 75, 1999.
24. *В.В.Соболев*, Движущиеся оболочки звезд, изд-во ЛГУ, Л., 1947.
25. *М.А.Погодин*, Астрофизика, **24**, 491, 1986.
26. *М.А.Погодин*, Астрофизика, **31**, 150, 1989.
27. *T.Böhm, C.Catala*, Astron. Astrophys., **301**, 155, 1995.
28. *F.Palla, S.W.Stahler*, Astrophys. J., **418**, 414, 1993.
29. *Л.В.Тамбовцева, В.П.Гринин, Б.Роджерс, О.В.Козлова*, Астрон. ж., **78**, 514, 2002.