

УДК: 524.3

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОКРЕСТНОСТИ
ЗВЕЗДЫ Ae ХЕРБИГА MWC 480 ПО ДАННЫМ
СПЕКТРАЛЬНОГО МОНИТОРИНГАО.В.КОЗЛОВА¹, В.П.ГРИНИН^{1,2,3}, Г.А.ЧУНТОНОВ⁴

Поступила 19 марта 2003

Представлены результаты спектральных наблюдений звезды Ae Хербига MWC480. Наблюдения выполнялись на 2.6-м телескопе КрАО и 6-м телескопе САО в окрестностях резонансного дублета натрия и линии He I $\lambda 5876\text{\AA}$, линии кислорода OI $\lambda 7774\text{\AA}$, линии H $_{\alpha}$ и некоторых других. Линия H $_{\alpha}$ имеет профиль типа P Cug, характерный для анизотропного истечения вещества с замедлением. Параметры профиля переменны на временной шкале порядка суток и более. Наибольшей переменности подвержено синее крыло профиля, в котором заметные изменения видны на интервале времени в несколько часов. Необычная форма профиля наблюдается в линиях натрия. Они имеют профили, напоминающие профиль типа P Cug, в синем крыле которых видны дискретные абсорбционные компоненты. Их количество, форма и радиальные скорости меняются со временем. Максимальная радиальная скорость равна -330 км/с, минимальная - около -50 км/с. Наибольшей переменности подвержены высокоскоростные компоненты. Анализ спектральной переменности позволяет сделать следующие выводы: 1) Внутренние слои аккреционного диска MWC480 подходят непосредственно к звезде: максимальное значение скорости вращения околозвездного газа, полученное по профилям линии кислорода OI 7774, близко к 400-500 км/с, что примерно соответствует радиусу последней кеплеровской орбиты. 2) В этой области формируется сильно неоднородная высокоскоростная компонента дискового ветра, в которой выделяются плотные фрагменты (микро-джеты). Их образование, по-видимому, вызвано неустойчивой структурой магнитного поля в ближайших к звезде слоях аккреционного диска. 3) Максимальные скорости микро-джетов лишь не намного превышают скорость убегания у поверхности звезды. Поэтому большая часть полученного ими импульса расходуется на преодоление гравитации звезды, что приводит к замедлению радиального движения газа. Такая структура излучающей области согласуется с магнито-центрбужными моделями дискового ветра, в которых главную роль в ускорении вещества играет собственное магнитное поле аккреционного диска.

1. *Введение.* Звезда MWC 480 (HD31648) находится в области звездообразования Taurus-Auriga и в каталоге Тэ и др. [1] классифицирована как звезда Ae Хербига ($Sp = A3er + sh$). Несколько лет назад Мэннингс и Кёрнер [2] получили изображение ее окрестностей в миллиметровом диапазоне (в континууме и в линии молекулы CO) и обнаружили вращающийся околозвездный диск, сильно наклоненный к лучу зрения: угол между осью вращения диска и лучом зрения $i \approx 30^\circ$. Они предположили, что этот диск является молодым аналогом более старых протопланетных дисков, подобных наблюдаемому вокруг β Pictoris.

Этот результат стимулировал нас включить MWC 480 в нашу программу спектроскопического мониторинга молодых звезд типа UX Ori, которые также считаются эволюционными предшественниками β Pictoris [3-6], но отличаются от MWC 480 наклоном околозвездных

дисков: с ребра или под небольшим углом к лучу зрения¹. Было интересно выяснить, чем отличаются спектры одинаковых в эволюционном отношении молодых звезд, имеющих близкие спектральные типы, и отличающиеся лишь ориентацией околозвездных дисков относительно луча зрения. Следует заметить, что хотя MWC 480 является одной из самых ярких молодых звезд ($V \approx 7^m.6$), спектральные наблюдения ее проводились эпизодически и носили в основном описательный характер [9-12]². Исключение составляют наблюдения Погодина [13], которые были любезно предоставлены нам для сравнения с нашими данными.

В данной статье мы приводим результаты спектральных наблюдений MWC 480 в окрестностях нескольких наиболее интересных спектральных линий, выполнявшихся в Крымской астрофизической обсерватории с 1998г. по 2002г. В течение одной ночи MWC 480 наблюдалась также с помощью 6-м телескопа САО в частотах резонансного триплета OI 7774Å. Сравнение с аналогичными наблюдениями звезд типа UX Ori показывает, что по своим спектральным особенностям и типу переменности спектральных линий эта звезда сильно отличается от звезд типа UX Ori тех же спектральных классов.

2. Наблюдения. Спектральные наблюдения MWC 480 выполнялись с 1998г. по 2002г. на телескопе КрАО 2.6-м с помощью спектрографа Кудэ, обеспечивающего спектральное разрешение $R = 20000$. Как и в случае звезд типа UX Ori, основная часть наблюдений проводилась в окрестности линии H_{α} , в области линий D Na I, кислорода OI 7774Å и некоторых других. Одновременно с линиями натрия наблюдалась также находящаяся рядом с ними линия нейтрального гелия 5876Å.

Редукция спектров (корректировка за плоское поле, учет фона неба, удаление космических частиц и т.д.) выполнялась с помощью пакета

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ MWC 480

L_*	M_*	T_{eff}	r_*	$V \sin i$
L_{\odot}	M_{\odot}	К	см	км/с
$32^{+13.3}_{-8.4}$	2.2 ± 0.3	8710	$1.7 \cdot 10^{11}$	90

Примечание. Значения L_* , M_* и T_{eff} взяты из статьи ван ден Анкера и др. [14]; $V \sin i$ - по данным настоящей статьи (см. п.3).

¹ Следует заметить, что в отличие от MWC 480 околозвездные диски звезд типа UX Ori пока еще не удалось разрешить. Заключение об их ориентации относительно луча зрения основано на изучении линейной поляризации в глубоких алгале-подобных минимумах [7,8].

² Это связано с тем, что MWC 480 относится к числу, так называемых, изолированных молодых звезд, которые не ассоциированы с яркими туманностями. Поэтому их принадлежность к молодым звездам долгое время была под вопросом.

программ SPE, разработанного в КраО С.Г.Сергеевым. Для очистки спектров от теллурических линий были получены спектры звезды спектрального класса A3 β Eг1 с величиной $V \sin i = 177$ км/с. Результаты наблюдений представлены на рис.1-4.

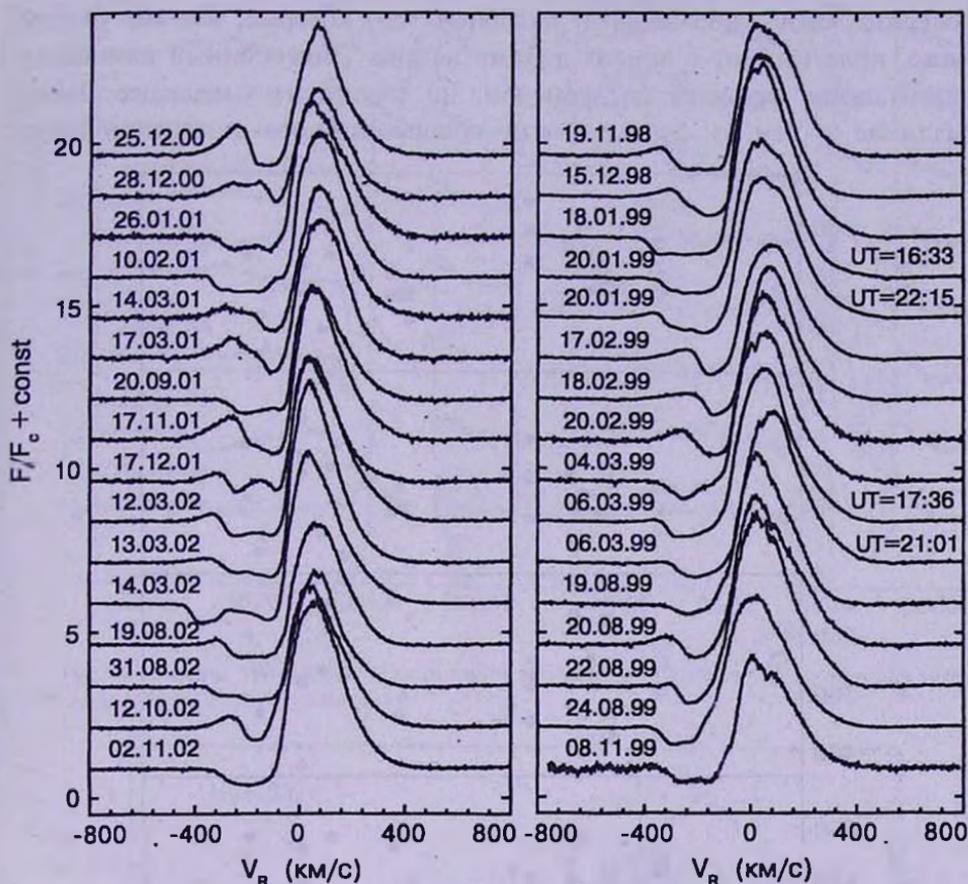


Рис.1. Линия H_{α} в спектре MWC 480 по данным наших наблюдений.

Кроме того, в течение одной ночи (19/20.12.99) MWC 480 наблюдалась на 6-м телескопе САО с помощью спектрографа ОЗСП. Наблюдения выполнялись непрерывно в течение 5-и часов 40 минут с экспозицией по 10 минут на каждый спектр. Всего было получено 26 спектров со спектральным разрешением $R = 13000$ и отношением сигнала к шуму $S/N \approx 100$. Результаты этих наблюдений представлены на рис.1, 4 и 5.

3. Результаты.

3.1. Линия H_{α} . Как видно из рис.1, линия H_{α} в спектре MWC 480 имеет профиль типа P Cyg, аналогичный наблюдаемому у классической Ae-звезды Хербига АВ Aug ([15,16]). Параметры профиля меняются со временем. Наибольшей переменности подвержено абсорбционное крыло

линии: его коротковолновая граница смещается от -300 км/с до -450 км/с (что отмечалось также в ранних исследованиях [9]). Заметные изменения в этой части профиля наблюдались нами на интервале времени всего несколько часов (см. профили линии за 20.01.99 и 06.03.99). При этом на всех спектрах абсорбционная часть профиля довольно гладкая и не содержит каких-либо деталей, подобных тем, которые, как мы увидим ниже, присутствуют в линиях дублета натрия. Эмиссионный компонент линии также меняется со временем, но значительно медленнее. Такое различие в темпах переменности абсорбционного и эмиссионного

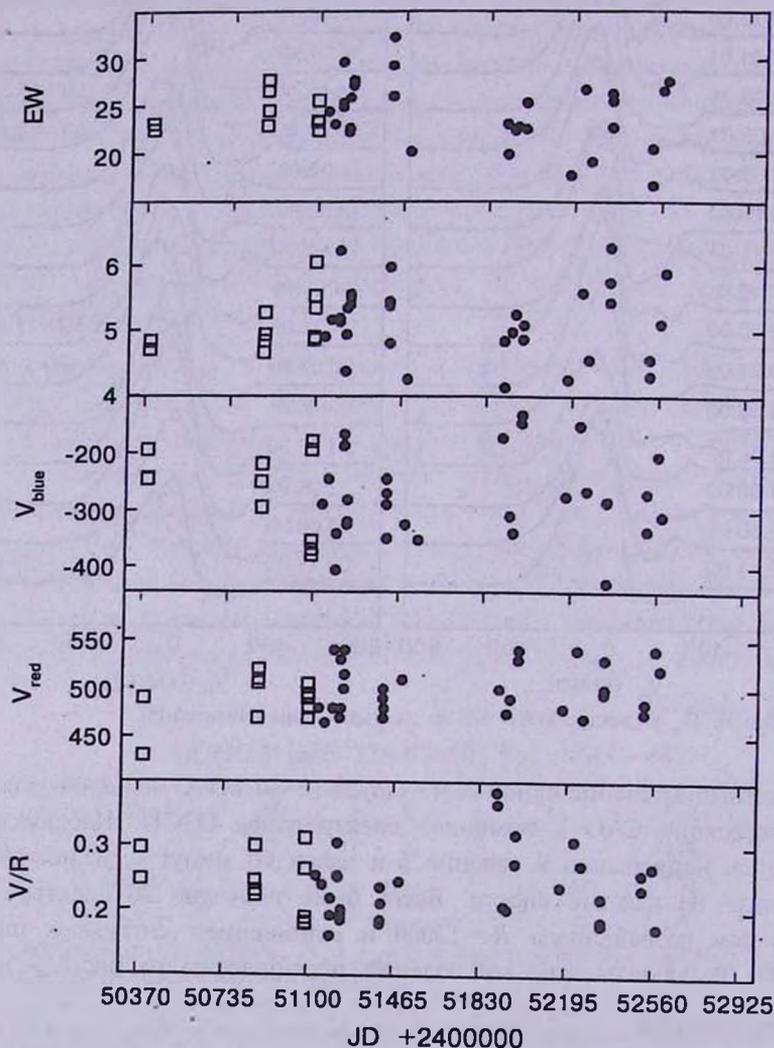


Рис.2. Поведение линии H_{α} в спектре MWC 480 по данным наших наблюдений (точки) и данным Погодиной [13] (квадраты). Сверху - вниз: Эквивалентная ширина линии, максимальная интенсивность, лучевые скорости красного и синего крыла линии на уровне 1% интенсивности континуума и отношение V/R .

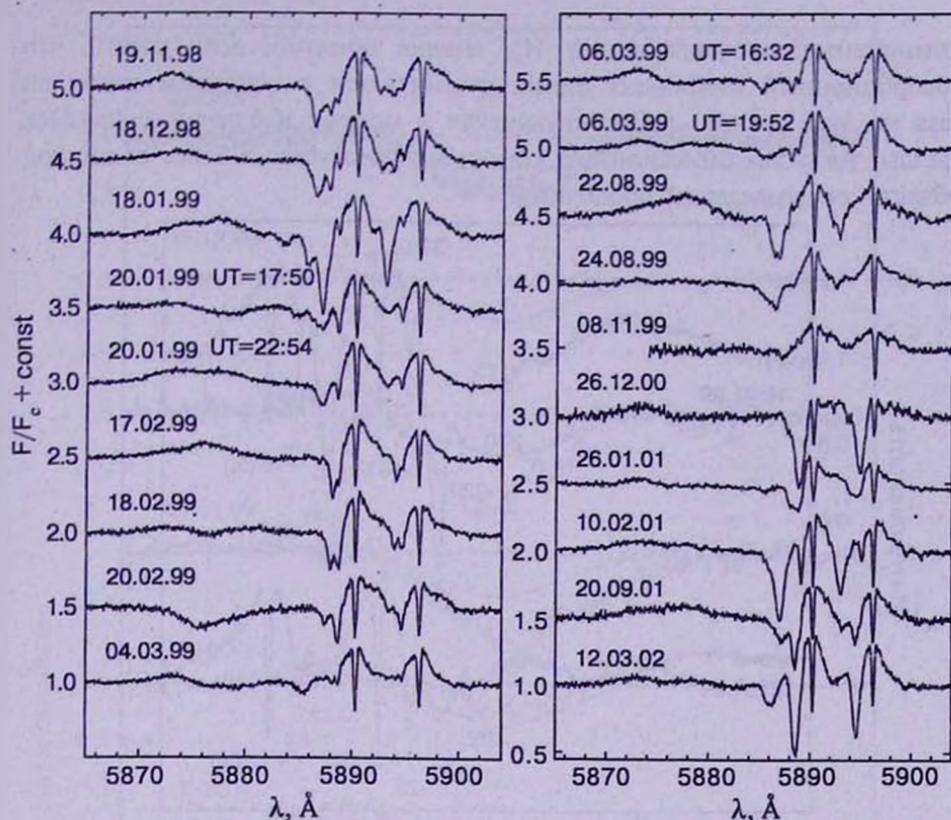


Рис.3а. Спектры MWC 480 в области линий резонансного дублета натрия и линия гелия 5876 \AA по данным наших наблюдений.

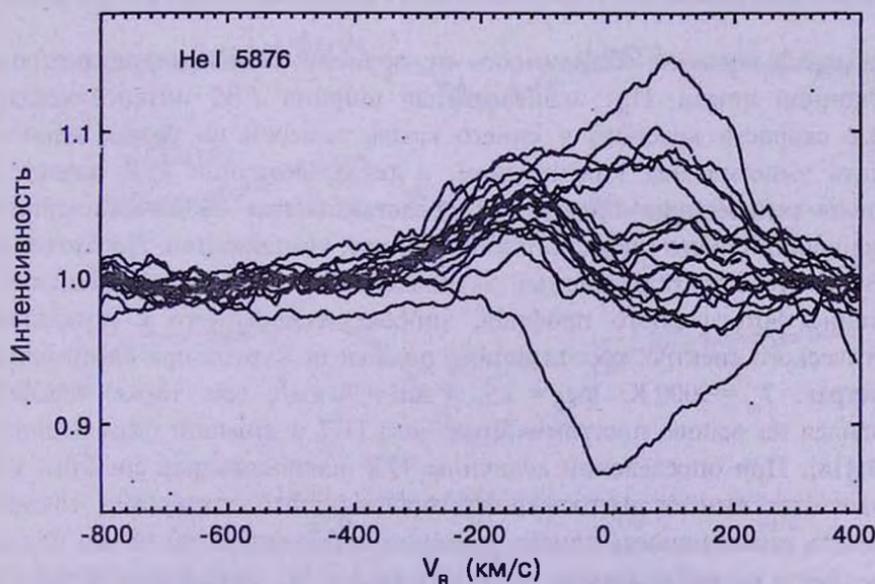


Рис.3б. Переменность линии гелия 5876 \AA в спектре MWC 480. Пунктиром показан средний профиль, полученный суммированием всех профилей линии гелия.

компонентов профиля линии H_{α} вполне понятно, если учесть, что абсорбционный компонент линии формируется в основном колонкой газа на луче зрения, проектирующей в момент наблюдений на диск звезды, тогда как эмиссионный компонент образуется в более обширной области околозвездной оболочки.

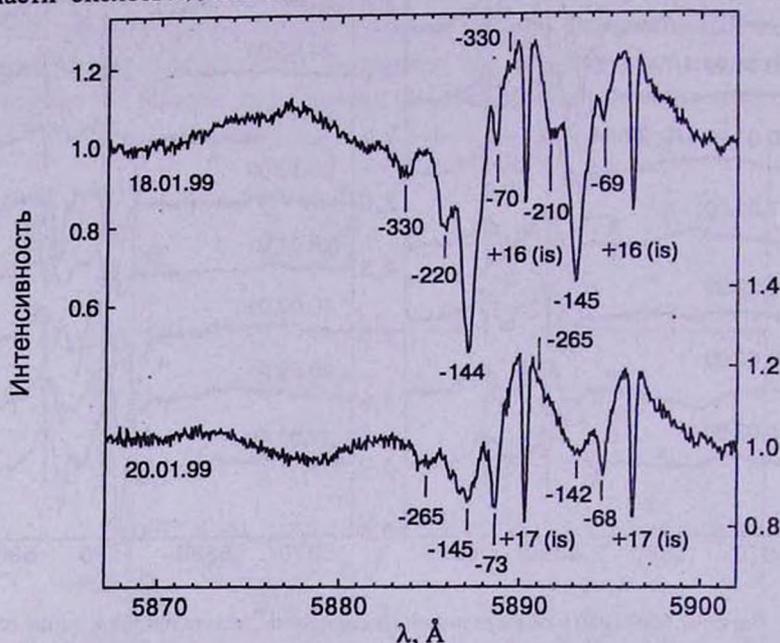


Рис.3с. Пример сильной переменности линии гелия и дискретной структуры в линиях натрия.

На рис.2 показана зависимость от времени основных параметров эмиссионной линии H_{α} : эквивалентная ширина EW , интенсивность, лучевые скорости красного и синего крыла эмиссии на уровне одного процента эмиссии над континуумом, а также величина V/R , характеризующая асимметрию профиля и представляющая собой отношение интенсивности синего и красного эмиссионных компонентов. Необходимо отметить, что для определения эквивалентной ширины проводилось вычитание фотосферного профиля, аппроксимированного с помощью синтетического спектра, рассчитанного по модели Куруца при следующих параметрах: $T_{\text{eff}} = 9000$ К, $\log g = 3.5$, $V \sin i = 90$ км/с (см. ниже). Расчет проводился на основе программ Пискунова [17] и атомной базы данных VALD [18]. При определении величины V/R использовались спектры, из которых был вычтен фотосферный профиль, что позволило точнее определить интенсивность синего эмиссионного компонента (в том числе в даты, когда на наблюдаемых профилях линии H_{α} синий эмиссионный компонент настолько слаб, что его трудно выделить визуально из

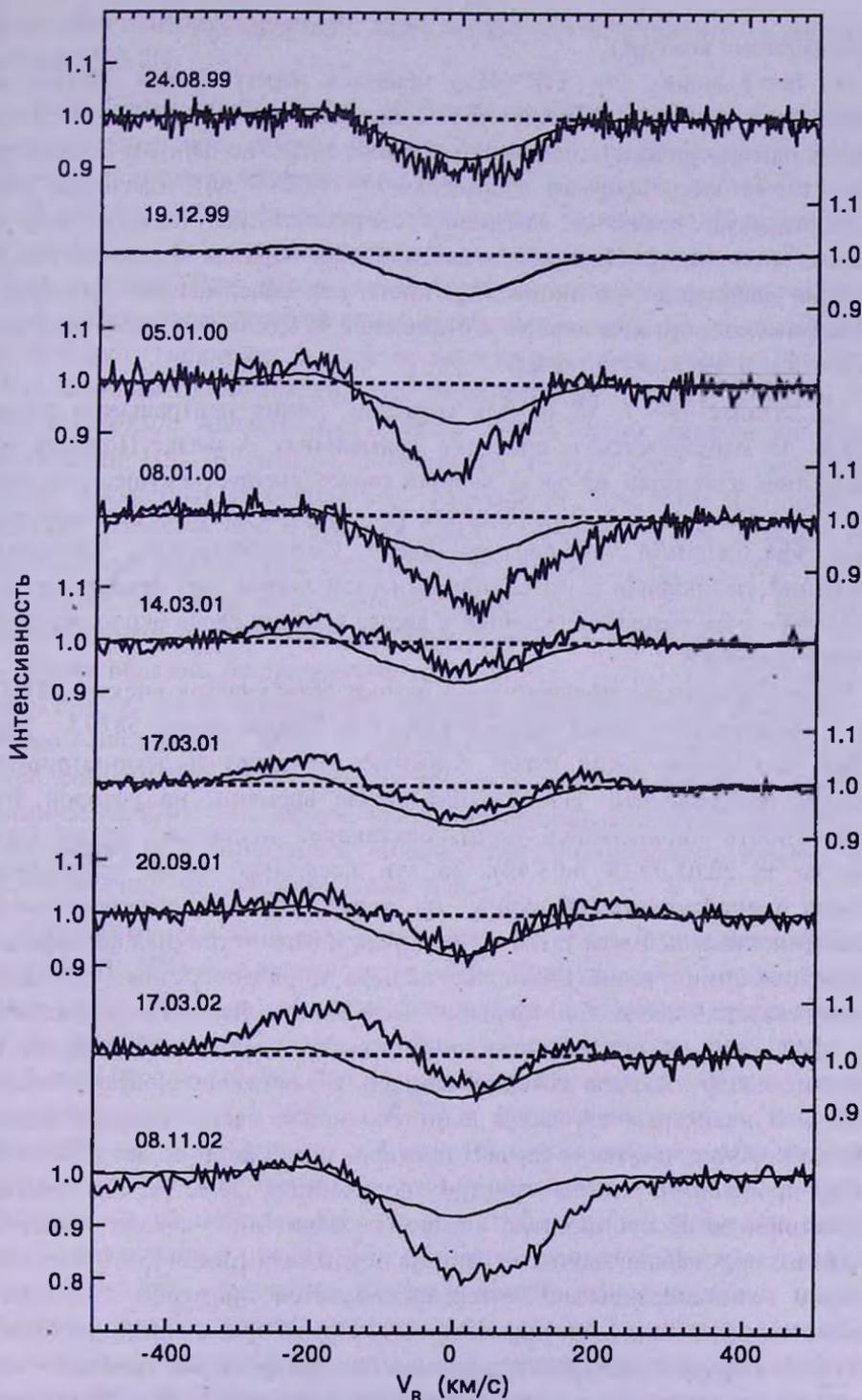


Рис.4. Профили линии кислорода OI 7774 по данным наблюдений на 2.6-м телескопе КраО и на 6-м телескопе САО (19/20.12.99). Последний показан для сравнения на всех спектрах тонкой линией.

фотосферного контура).

Из рис.2 видно, что $EW(H_{\alpha})$ меняется нерегулярным образом в интервале от примерно 17 \AA до 33 \AA . Учитывая, что MWC 480 относится к числу фотометрически спокойных молодых звезд (по данным де Винтер и др. [19] ее блеск меняется в пределах $V=7^m.66 - 7^m.86$), изменения $EW(H_{\alpha})$ отражают реальные изменения светимости излучающего газа в частотах этой линии. Наряду с этим заметным образом меняются также и другие характеристики линии H_{α} , такие, как максимальная интенсивность эмиссионного компонента и отношение V/R , к обсуждению которых мы вернемся несколько позже.

3.2. Линия He I 5876. Как известно, линия нейтрального гелия 5876 \AA не наблюдается в спектрах нормальных A-звезд. Поэтому ее присутствие в спектрах Ae-звезд Хербига свидетельствует о существовании в околосредном газе горячих областей, температура которых существенно выше эффективной температуры звезд. Соответственно, изучение переменности профиля и интенсивности этой линии дает представление о структуре и динамике ближайших к звезде горячих слоев околосредной газовой оболочки.

На рис.3а показан полученный в разные даты участок спектра MWC 480 в окрестности линий натрия D Na I и линии гелия 5876 \AA . Мы видим, что линия гелия имеет сложную структуру и демонстрирует быструю переменность. Наименьшая шкала времени, на которой эта переменность наблюдалась нами, составляет несколько часов (см. спектры за 20.01.99 и 6.03.99). За эти несколько часов произошла сильная трансформация профиля: на месте широкой асимметричной эмиссии появилась почти такая же широкая и асимметричная абсорбция. Изменения линии гелия настолько сильны и разнообразны, что даже трудно сказать, какой вид профиля этой линии наиболее характерен для MWC 480. В большинстве спектров эта линия наблюдается в эмиссии, центр тяжести которой смещен в коротковолновую область спектра. В некоторых случаях в длинноволновой части профиля видна слабая абсорбция, и в таких случаях профиль линии напоминает обратный P Cug профиль. В одном спектре, полученном 20.02.99, мы видим асимметричную абсорбционную линию без каких-либо следов эмиссии.

Анализ всех наблюдавшихся спектров показывает (рис.3б), что эмиссия в линии гелия перекрывает интервал скоростей примерно $\pm 300 \text{ км/с}$. При этом в отдельные ночи протяженность синего крыла линии достигает -500 км/с . Наряду с быстрой переменностью профиля это означает, что данная линия образуется в самых внутренних слоях околосредной газовой оболочки, имеющих высокую температуру и сложное поле скоростей. Средний по всем спектрам профиль этой линии имеет асимметричную

двухкомпонентную структуру, характерную для излучения аккреционных дисков [20,21].

3.3. *Линии резонансного дублета натрия.* Необычный вид имеют линии резонансного дублета натрия. Как видно из рис.3а, профили этих линий напоминают профиль типа P Cug, но отличаются от него тем, что в абсорбционном крыле линии наблюдаются дискретные абсорбционные компоненты. Их количество, форма и лучевые скорости меняются от ночи к ночи. При этом самые быстрые изменения происходят в высокоскоростных абсорбционных компонентах, которые то появляются, то исчезают. Например, в первых, полученных нами спектрах 19.11.98 и 18.12.98 видны три абсорбционных компонента на лучевых скоростях -72, -118 и -188 км/с. Аналогичные профили линий натрия наблюдались также Погодиным [13]. В спектре, полученном 18.01.99 (рис.3с), видны уже четыре дискретных абсорбционных компонента. При этом максимальная скорость движения газа в эту ночь равна -330 км/с. Из рис.3а видно, что эмиссионные компоненты линий D1 и D2 разделены узкими абсорбционными линиями межзвездного происхождения, которые являются единственными стабильными деталями линий дублета натрия.

Таким образом, по сравнению с линией H_{α} , также имеющей профиль типа P Cug, но с совершенно гладким абсорбционным провалом, в котором нет никаких деталей, указывающих на неоднородную структуру ветра, резонансные линии дублета натрия показывают значительно более сложную картину. Мы видим, что в истекающем газе имеются плотные образования с повышенным содержанием нейтрального натрия. Их происхождение мы обсудим ниже в п.4.

3.4. *Линии резонансного триплета OI 7774.* Линии резонансного триплета OI 7774 в спектрах звезд Ae/Be Хербига обычно представляют собой бленду, состоящую из фотосферной линии, расширенной вращением звезды, и околозвездной линии, которая может наблюдаться как в эмиссии, так и в абсорбции [22-24]. Как следует из рис.4, именно такой вид имеет эта линия в спектре MWC 480. Она представляет собой широкую абсорбцию, по краям которой наблюдается слабая эмиссия, обычно более интенсивная с синей стороны от линии поглощения. Параметры профиля меняются как от ночи к ночи, так и в течение одной ночи (см. ниже). Иногда эмиссионные компоненты полностью исчезают. В целом профиль линии кислорода напоминает профиль линии, образующейся в газовой оболочке с преобладающим дифференциальным вращением и радиальным движением по направлению к звезде [20]. Иными словами, это профиль, характерный для режима дисковой аккреции.

Обращает на себя внимание сходство профиля этой линии с усредненным профилем линии гелия (рис.3б), которое указывает на то,

что обе линии образуются примерно в одной и той же области околосветной газовой оболочки. Как и в случае линии гелия, максимальные лучевые скорости в линии кислорода наблюдаются в синем эмиссионном крыле и в отдельные ночи достигают -400 км/с.

Особый интерес представляет последовательность профилей линии кислорода, полученная в течение одной ночи 19/20.12.99 на 6-м телескопе САО (рис.5а, б). Экспозиция каждого спектра составляла 10 минут.

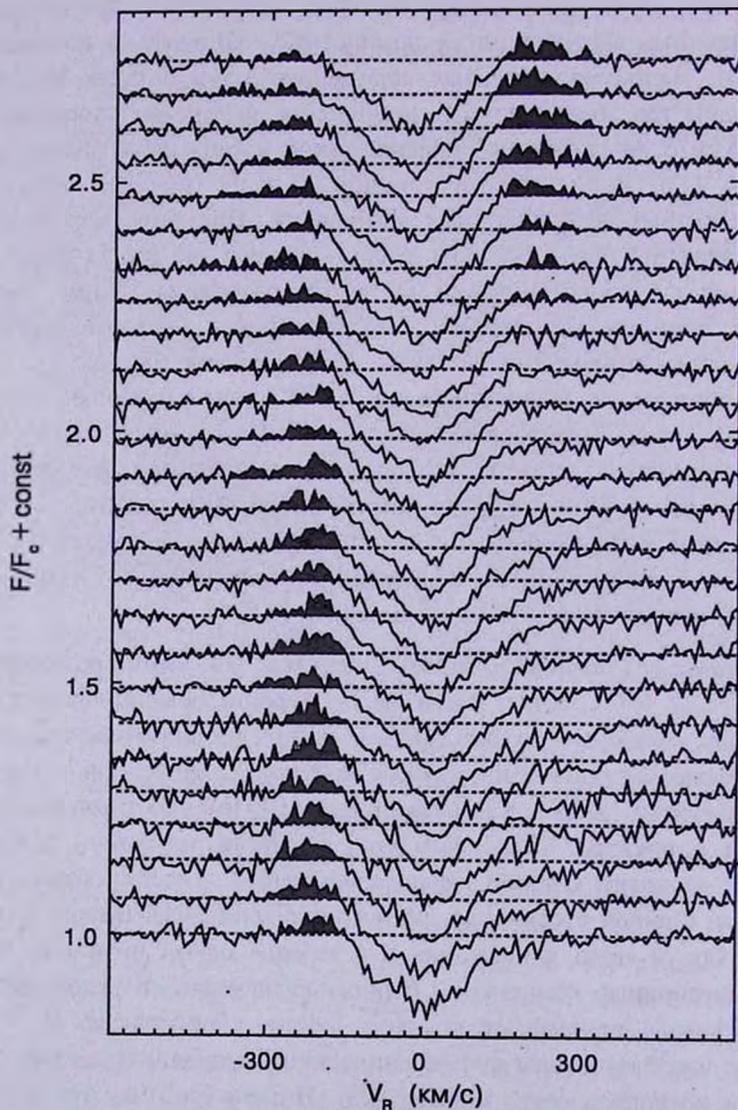


Рис.5а. Быстрая переменность профиля линии кислорода OI 7774 по данным наблюдений на 6-м телескопе САО. Экспозиция каждого спектра равна 10 мин; интервал времени между концом одной экспозиции и началом следующей равен 3 мин. Общая продолжительность серии из 26 последовательных экспозиций равна 5 часам 40 мин.

Всего в течение 5 часов 40 минут было получено 26 спектров с отношением $S/N = 100$. Сумарный профиль, полученный усреднением всех 26-и спектров, имеет отношение $S/N > 400$ и показан на рис.4.

Из рис.5а видно, что на первых спектрах в красном крыле линии кислорода наблюдается слабая эмиссия, простирающаяся по лучевым скоростям от 0 до примерно 250-300 км/с. С течением времени эта эмиссия ослабевает и исчезает полностью. Спустя некоторое время слабый эмиссионный компонент начинает усиливаться в синем крыле линии,

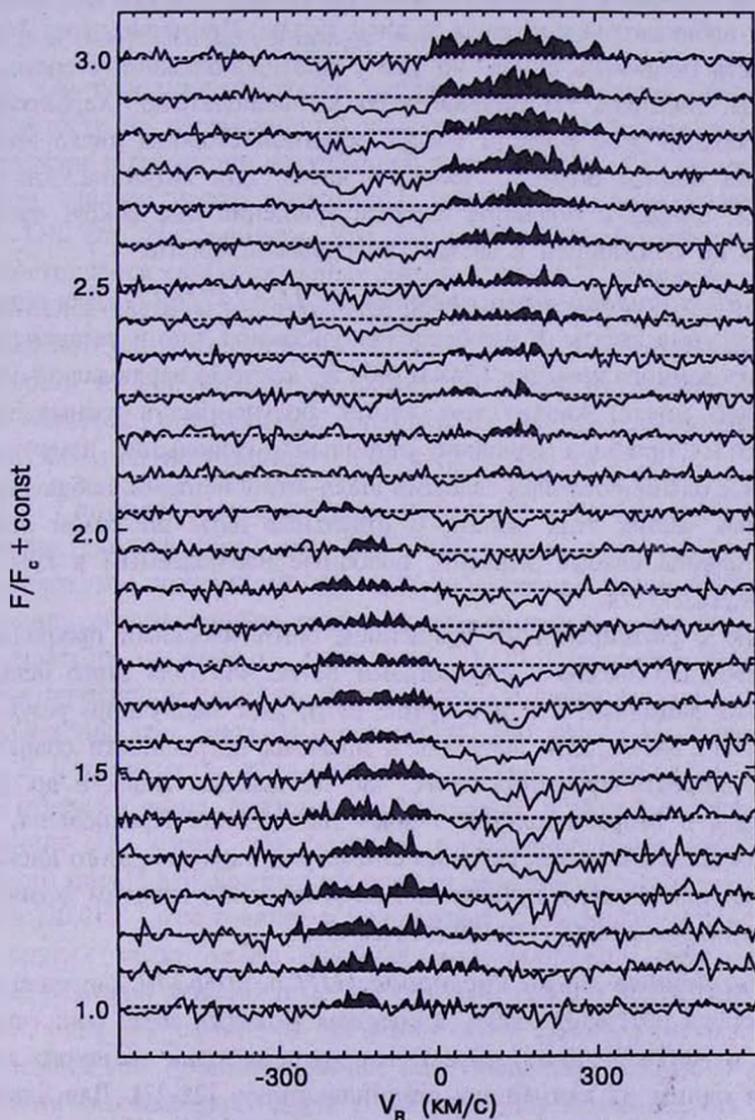


Рис.5б. Разность между наблюдаемым и средним профилем линии OI 7774, по данным рис.5а. Отчетливо видна смена знака асимметрии линии, наблюдавшаяся в течение ночи и обусловленная вращением ближайших к звезде слоев аккреционного диска MWC 480.

достигая максимума к концу серии и заполняя примерно такой же интервал лучевых скоростей от примерно 250 км/с до 0. Переменная эмиссия в красном и синем крыльях линии близка также и по интенсивностям, что хорошо видно из рис.5b, на котором показаны разности между наблюдаемым спектром и средним спектром, полученным путем усреднения всех 26 экспозиций. Это говорит о том, что наблюдавшаяся в течение почти 6-и часов трансформация профиля была, вероятнее всего, вызвана *одной и той же* областью вращающейся газовой оболочки (имевшей более высокую излучательную способность в линии кислорода), которая в начале наблюдений удалялась от наблюдателя и уходила за диск звезды. Примерно через 3 часа эта же область появилась снова, но уже с противоположной стороны от диска звезды, двигаясь по направлению к наблюдателю. Характерное время полуоборота этой области вокруг обратной стороны диска звезды составило, по нашим оценкам, около 4 часов. Эта величина, как мы увидим ниже, близка к половине периода вращения газа вокруг звезды, движущегося по ближайшей к звезде кеплеровской орбите.

3.5. *Линии ионизованного кремния Si II 6347/6371.* Для оценки скорости вращения звезды $V \sin i$ были использованы линии резонансного дублета ионизованного кремния 6347 и 6371 Å, которые наблюдались нами в течение ряда ночей. Анализ этих линий, полученных в разные даты, показал, что их профили довольно стабильны. Небольшие изменения, обусловленные блендированием слабыми шелл-компонентами, наблюдались в центральных частях этих линий. В отдельные даты по краям линий поглощения видны слабые эмиссии, подобные наблюдаемым в крыльях линии кислорода 7774.

Сравнение с расширенными вращением синтетическими профилями, рассчитанными для звезды с параметрами MWC 480 (для этого использовалась та же методика, что и в статье [24]), дает наилучший результат при $V \sin i = 90 \pm 5$ км/с. Это значение в пределах погрешности совпадает с оценками скорости вращения MWC 480 по данным Яшек и др. [22]: $V \sin i = 80$ км/с и Мора и др. [6]: $V \sin i = 102 \pm 5$ км/с. Предполагая, что ось вращения звезды совпадает с осью симметрии околозвездного диска и, следовательно, наклонена к лучу зрения на угол $i = 30^\circ$, находим истинную скорость вращения звезды: $V = 180 \pm 10$ км/с.

3.6. *Запрещенные линии кислорода [OI] 6300/6340.* Запрещенные линии кислорода [OI] 6300/6340 Å в спектрах молодых звезд (как типа Т Тельца, так и Ae/Be Хербига) образуются на периферии звездного ветра и считаются одним из важнейших его индикаторов [25-27]. Для анализа обычно используется более сильная из этих линий $\lambda 6300$ Å. Как показывают исследования (см., например, [28,29]), ее эквивалентная ширина хорошо коррелирует с ИК-избытками и эквивалентной шириной линии H_α . Тем

удивительнее оказался отрицательный результат, который мы получили, исследовав область спектра MWC 480 в окрестности длины волны 6300 \AA и убедившись в том, что она не содержит никаких следов запрещенной линии [OI]. По нашим оценкам, верхняя граница эквивалентной ширины этой линии в спектре звезды на момент наших наблюдений не превышала 0.03 \AA . Это значение в несколько раз меньше эквивалентной ширины линии [OI] 6300 \AA в спектре классической Ae-звезды Хербига AV Aug, имеющей примерно такой же спектральный класс, примерно такую же ориентацию околозвездного диска относительно луча зрения [30] и близкие значения эквивалентной ширины линии H_{α} [29].

4. *Обсуждение.* Характер наблюдаемых профилей линий, а также особенности их переменности позволяют сделать определенные выводы о структуре и геометрии излучающей области MWC 480. Важное значение в этом анализе имеют результаты, полученные нами ранее для звезд типа UX Ori. Напоминаем, что звезды этого типа относятся к числу фотометрически самых активных молодых звезд. Переменность их блеска, показателей цвета и линейной поляризации хорошо объясняется моделью переменной околозвездной экстинкции [31], и есть основания полагать, что одной из причин бурной фотометрической активности звезд этого типа является "оптимальная" ориентация их околозвездных дисков: с ребра, или под небольшим углом к лучу зрения [7,8].

4.1. *Сравнение со звездами типа UX Ori.* Как было отмечено во Введении, околозвездный диск MWC 480 сильно наклонен к лучу зрения. Не удивительно поэтому, что эта звезда, обладающая мощным ИК-избытком излучения, обусловленным тепловым излучением околозвездной пыли, не показывает (в отличие от звезд типа UX Ori) сколько-нибудь заметной фотометрической активности. Другое важное отличие касается спектральных характеристик этих звезд. В случае MWC 480 линия H_{α} имеет профили типа P Cug, то есть, указывает на истечение вещества, имеющее, как было отмечено выше, анизотропный характер. В случае же звезд типа UX Ori линия H_{α} имеет, как правило, двухкомпонентные профили аккреционного типа [3,5,6], которые образуются во внутренних слоях аккреционных дисков [20,21]. Такое отличие в кинематике излучающего газа характерно и для других звезд Ae/Be Хербига, отличающихся разным уровнем фотометрической активности [8,32]. Оно обусловлено двумя причинами: во-первых, сложным характером движений газа в окрестностях молодых звезд, сочетающим два противоположных вида движений: аккрецию вещества в плоскости околозвездного диска и анизотропное истечение, ось симметрии которого ортогональна этой плоскости. Во-вторых, тем обстоятельством, что уровень фотометрической активности звезд Хербига, обусловленной переменным экранированием звезд околозвездными газопылевыми облаками,

зависит от ориентации экваториальной плоскости околос звездных дисков относительно луча зрения [7,8]. Поэтому сравнительное изучение звезд Хербига одних и тех же спектральных классов, но имеющих разную амплитуду фотометрической переменности, дает возможность рассматривать их излучающие области с разных сторон [32].

4.2. *Механизм истечения газа.* Физические основы рассмотренной выше кинематической модели, сочетающей аккрецию и истечение газа, хорошо изучены в случае звезд типа Т Тельца и описываются в рамках, так называемой, магнитосферной модели аккреции (см. [33] и цитированную там литературу). Согласно этой модели, анизотропное истечение образуется в результате взаимодействия аккреционного диска с магнитосферой звезды, то есть фактически с ее глобальным магнитным полем.

Эта модель, однако, не является единственно возможной. Существует еще одна разновидность дисковой аккреции: так называемая, магнитоцентробежная модель (см. обзор Кенигла [34] и цитированную там литературу), в которой истечение вещества происходит в результате его взаимодействия с собственным магнитным полем диска, которое усиливается по мере приближения аккрецирующего газа к звезде. В обеих моделях крупномасштабная структура движений в окрестности звезды в общих чертах одинакова и представляет собой комбинацию дисковой аккреции и анизотропного истечения, ось симметрии которого совпадает с осью диска. Различия между этими моделями появляются лишь в непосредственной близости от звезды: в магнитосферной модели существует зона коротации, радиус которой зависит от напряженности глобального магнитного поля звезды и темпа аккреции. У звезд типа Т Тельца он достигает 5-10 радиусов звезды [33], тогда как у звезд типа Ae/Be Хербига радиус коротации значительно меньше и сравним с радиусом звезды [20,21]. Внутри зоны коротации газ вращается с угловой скоростью звезды и падает на нее вдоль линий магнитного поля. Вблизи радиуса коротации часть аккрецирующего газа отбрасывается назад и образуется звездный ветер.

В магнитоцентробежной модели аккреции радиус коротации отсутствует. Аккреционный диск может контактировать непосредственно со звездой и образование высокоскоростной компоненты ветра происходит в ее ближайшей окрестности [34].

4.3. *Аргументы в пользу магнитоцентробежной модели ветра.* Представленные выше наблюдения быстрой переменности в линии кислорода свидетельствуют в пользу магнитоцентробежного механизма образования ветра. Действительно, для того, чтобы фрагмент газовой оболочки мог за время около 4-х часов совершить пол-оборота вокруг звезды, он должен двигаться по орбите, близкой к поверхности звезды. При массе звезды $M_* = 2.2 M_{\odot}$ и радиусе $r_* = 1.7 \cdot 10^{11}$ см (см. табл.1)

максимальная кеплеровская скорость у поверхности звезды равна 410 км/с. (Заметим, что с учетом наклона оси вращения звезды $i \approx 30^\circ$ этой скорости соответствует значение ≈ 200 км/с, близкое по порядку величины к максимальной скорости вращения газа, наблюдавшейся по линии OI 7774 Å (см. выше)). Двигаясь с такой скоростью, внутренние слои аккреционного диска совершают пол-оборота за 3.8 часа, что хорошо согласуется с оценкой, сделанной выше по переменной линии кислорода.

Таким образом, наблюдавшаяся нами быстрая переменность профиля линии OI 7774 Å свидетельствует о том, что дисковый ветер MWC 480, вероятнее всего, образуется под действием магнитоцентробежного механизма истечения вещества из ближайших к звезде слоев аккреционного диска¹. Тот факт, что в спектре MWC 480 нет сильных линий аккреционного типа, которые характерны для звезд типа UX Ori [3-6], объясняется тем, что плоскость аккреционного диска у этой звезды наклонена к лучу зрения под углом 60° и по этой причине аккрецирующий газ экранирует лишь небольшую часть видимого диска звезды.

4.4. *Структура и кинематика ветра.* Есть основания предполагать, что вещество дискового ветра также экранирует не весь диск звезды, а лишь некоторую его часть, поскольку ни на одном из наблюдавшихся нами спектров абсорбционный компонент линии H_α не опускается ниже уровня ≈ 0.6 (рис.1). Эта особенность находит свое объяснение, если принять, что истечение газа происходит в конусе, ось которого наклонена к лучу зрения под углом примерно 30° .

Общий вид профиля линии H_α в спектре MWC 480 с характерным резким переходом от эмиссии к абсорбции (рис.1) напоминает теоретические профили, образующиеся в оболочках, расширение которых происходит с замедлением [36]. По данным Имхофф [37] аналогичные профили наблюдаются у некоторых других звезд Хербига в резонансных линиях в ультрафиолетовой области спектра.

Образование истечений с замедлением, вообще говоря, трудно объяснимо в случае сплошного в гидродинамическом смысле, стационарного движения газа [38]. Однако, если истекающее вещество представляет собой совокупность газовых блоков, получающих в процессе ускорения скорости, не намного превышающие скорость убегания, то существование замедляющегося на периферии звездного ветра представляется вполне естественным. Такая структура ветра хорошо подходит также для объяснения характера переменности, наблюдаемой у MWC 480 в узких абсорбционных компонентах линий D Na I. Как отмечалось выше, самая быстрая переменность характерна для высокоскоростных деталей этих линий,

¹ Другим аргументом в пользу магнитоцентробежного механизма аккреции является отрицательный результат измерений магнитного поля у MWC 480 Глазевским и Чунтоновым [35].

образующихся в непосредственной близости от звезды, тогда как низкоскоростные компоненты образуются дальше от звезды и меняются значительно медленнее.

Возникает вопрос: чем вызвано появление дискретной структуры дискового ветра, существование в нем плотных газовых струй (блобов), в которых образуются узкие абсорбционные компоненты линий натрия, и наблюдается ли нечто подобное в спектрах других молодых звезд?

Из наблюдений звезд типа Т Тельца известно, что в спектрах некоторых из них в линиях натрия также присутствуют дискретные абсорбционные компоненты с лучевыми скоростями в диапазоне от, примерно, двухсот до нескольких десятков км/с. Однако в работе Мундта [39], в которой эти компоненты были впервые детально исследованы, отмечалась их стабильность на временной шкале порядка нескольких лет, на основании чего был сделан вывод о том, что они образуются на большом удалении от звезд, в газовых оболочках, выброшенных звездами в предыдущие эпохи. Поэтому, несмотря на внешнее сходство, дискретные абсорбционные компоненты в спектрах звезд типа Т Тельца существенно отличаются от наблюдавшихся нами в спектре MWC 480.

Если обратиться вновь к звездам типа UX Ori, которые, как отмечалось выше, отличаются от фотометрически спокойных молодых звезд таких же спектральных классов ориентацией околос звездных дисков относительно луча зрения, то можно провести определенную аналогию в поведении линий натрия в спектрах этих звезд и MWC 480. У звезд типа UX Ori в линиях натрия, а также в линиях некоторых других металлов часто наблюдаются переменные аккреционные детали с лучевыми скоростями до +300 км/с [3-5,40,41]. Поскольку звезды типа UX Ori имеют более высокие температуры и светимости по сравнению со звездами типа Т Тельца, то появление нейтрального натрия в непосредственной близости от таких звезд требует выполнения весьма специфических условий. Поэтому одна из интерпретаций абсорбционных компонентов линий натрия основана на аналогии с β Pictoris и исходит из предположения, что в окрестностях звезд типа UX Ori происходит образование планетных систем и наряду с обычным газом вблизи молодой звезды могут появляться продукты сублимации крупных планетозимальных тел и протокомет, в том числе натрий [3-5,40]. Согласно другой интерпретации [42], нейтральный натрий вблизи горячей звезды может появиться в количестве, необходимом для образования абсорбционных линий, если фотоионизации уравновешиваются достаточно частыми рекомбинациями. Для этого, как показывают расчеты, необходим ионизованный газ достаточно высокой плотности ($n_e \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$). В этих условиях образование линий нейтрального натрия вблизи звезды возможно даже при химсоставе газа, близком к нормальному.

Таким образом, существование дискретных абсорбционных компонентов в линиях натрия в спектрах звезд типа UX Op1 наводит на мысль о том, что и в случае MWC 480 появление подобных компонентов может быть обусловлено неоднородной структурой самого аккреционного диска.

Другая причина появления дискретных абсорбционных компонентов может быть связана непосредственно с самим механизмом образования дискового ветра. Выше мы привели аргументы в пользу магнитоцентробежной модели ветра. Магнитное поле аккреционного диска, играющее в этой модели главную роль в ускорении газа, может иметь сложную топологию, быстро меняющуюся со временем, что должно отражаться на структуре ветра. В недавно опубликованной статье Рейпурса и др. [43], посвященной фуороподобному объекту BBW 78, авторы предположили, что эта особенность механизма ускорения газа может быть причиной появления в спектре фуора дискретных абсорбционных деталей в коротковолновой части профилей линий D Na I. Как и в нашем случае, эти компоненты переменны на временной шкале порядка суток и их лучевые скорости лежат, примерно, в том же интервале, что и у MWC 480. Вполне возможно поэтому, что в обоих случаях наблюдаются родственные явления, обусловленные процессами ускорения газа и истечения его из аккреционного диска.

4.5. Долговременная переменность в линии H_{α} . Спектральное поведение молодых звезд на шкале времени от нескольких лет и более представляет собой отдельную, очень важную и малоизученную проблему. Ее сложность обусловлена прежде всего большим промежутком времени, необходимым для накопления данных. По этой причине на сегодняшний день имеется всего несколько Ae/Be звезд Хербига, спектральное поведение которых в линии H_{α} и некоторых других линиях прослежено на достаточно длинном промежутке времени (несколько лет и более).

Наши наблюдения в линии H_{α} охватывают промежуток времени с 1998г. по 2002г. и позволяют вместе с данными Погодина проследить за поведением этой линии на протяжении 5-и лет. На рис.2 показана зависимость от времени основных параметров эмиссионной линии H_{α} : эквивалентная ширина EW , интенсивность, лучевые скорости красного и синего крыла эмиссии на уровне одного процента эмиссии над континуумом, а также величина V/R , характеризующая асимметрию профиля. Видно, что у MWC 480 существует сильная переменность на шкале времени порядка нескольких суток, в результате которой эквивалентная ширина линии H_{α} может меняться более, чем на 30%. Можно заподозрить также существование многолетнего тренда, определяющего минимальное наблюдавшееся значение $WE (H_{\alpha})$. При этом поведение интенсивности эмиссионного компонента линии, по-видимому, не имеет заметной многолетней составляющей и определяется только переменностью на шкале времени сутки.

Из рис.2 видно также, что амплитуда переменности лучевой скорости синего крыла линии составляет около 200 км/с, что заметно превосходит аналогичный параметр для красного эмиссионного крыла и свидетельствует о доминировании процесса истечения в ближайших к звезде областях околос звездного диска. При этом шкала времени, на которой наблюдается эта переменность, порядка нескольких суток, в то время как на промежутке времени в 5 лет никакой зависимости не наблюдается.

Отношение V/R меняется более сложным образом. С одной стороны, для этого параметра характерна быстрая и, по-видимому, хаотическая зависимость от времени, подобная той, которая наблюдается в поведении эйввалентной ширины и интенсивности линии H_{α} . С другой стороны, в распределении точек на рис.2 можно заподозрить существование многолетней волны с характерным временем около 4-х лет. Насколько эта волна реальна, сказать пока трудно. Для более точных выводов необходимо накопление по возможности более равномерного ряда наблюдений в течение более длительного промежутка времени.

5. *Заключение.* Судя по характеру переменности, которую мы наблюдали в спектре MWC 480 в линиях натрия и кислорода, источником звездного ветра являются внутренние слои аккреционного диска, непосредственно примыкающие к звезде. При этом высокоскоростная часть ветра представляет собой совокупность газовых струй (микро-джетов), которые ускоряются и выбрасываются из этой области предположительно под действием магнитоцентробежного механизма. Начальные скорости микро-джетов не намного превышают скорость убегания у поверхности звезды, в результате чего формируется анизотропное истечение газа с замедлением наружу.

Мы привели аргументы в пользу магнитоцентробежной модели аккреции, основываясь на быстрой переменности профиля линии $OI\ 7774\ \text{\AA}$, которую наблюдали в течение одной ночи с помощью 6-м телескопа САО. Представляет большой интерес продолжить подобные наблюдения для более детального изучения вращательной модуляции профиля этой линии, обусловленной, как мы предполагаем, не вращением магнитосферы звезды, а более быстрым вращением замагниченного аккреционного диска. Подтверждение этого результата будет означать, что процесс аккреции газа на молодые звезды промежуточных масс отличается от процесса аккреции на молодые маломассивные звезды типа Т Тельца. В последнем случае важную роль играет глобальное магнитное поле звезд. Образованная им магнитосфера создает обширную зону коротации вокруг звезды, способную контролировать движение газа вплоть до 5-10 r . [33]. У звезд типа Ae/Be Хербига зона коротации мала [20,21], а в случае MWC 480, по-видимому, отсутствует вовсе. Газ, аккрецирующий на такую звезду, имеет, во-первых, более

высокий угловой момент по сравнению с угловым моментом поверхностных слоев звезды и способен поэтому ускорять ее вращение. Во-вторых, поскольку на звезду аккрецирует газ с магнитным полем, усиленным в аккреционном диске, то этот процесс представляет большой интерес с точки зрения генерации магнитных полей на Ар-звездах. Напомним, что один из сценариев образования магнитных Ар-звезд основан на идее захвата реликтового магнитного поля на ранних стадиях образования звезд [35]. Мы предполагаем, что, как и в случае фуороподобного объекта BW 75, образование дискретной структуры дискового ветра может быть следствием сложной и быстро меняющейся топологии магнитного поля в аккреционном диске звезды.

Интересной особенностью MWC 480 является отсутствие в ее спектре запрещенной линии кислорода 6300\AA , являющейся одним из индикаторов звездного ветра молодых звезд. Возможно, это связано с замедлением истечения, в результате чего концентрация газа на периферии оказалась довольно высокой, а электронная температура - ниже значений, необходимых для возбуждения этой линии.

Авторы благодарны М.А.Погодину за предоставление данных наблюдений MWC 480 до их опубликования и Л.В.Тамбовцевой за обсуждение и полезные замечания. Работа выполнена при поддержке гранта Президиума РАН "Нестационарные процессы в астрономии" и гранта "Ведущие научные школы".

¹ Крымская астрофизическая обсерватория, Украина

² Главная астрономическая обсерватория РАН Пулково, Россия, e-mail: grinin@VGi723.spb.edu

³ Астрономический институт им. В.В.Соболева при СПбГУ, Петербург, Россия

⁴ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Россия

DYNAMICAL PROCESSES IN THE NEAREST VICINITY OF HERBIG Ae STAR MWC 480 FROM THE DATA OF THE SPECTRAL MONITORING

O.V.KOZLOVA¹, V.P.GRININ^{1,2,3}, G.A.CHUNTONOV⁴

We present the results of spectral observations of Herbig Ae star MWC480. The observations were carried out with 2.6-m telescope of the Crimean Astrophysical Observatory and 6-m telescope of Special Astrophysical Observatory in the region of sodium resonance doublet and helium line $\text{He } \lambda 5876\text{\AA}$, $\text{OI } \lambda 7774\text{\AA}$

line, H_{α} emission line and some others. H_{α} emission line has P Cyg profile typical for the anisotropic decelerated outflows. The profile parameters are variable on the time scale of days and more. The strongest variability has been observed in the blue wing which showed noticeable changes on the time scale of few hours. Unusual profile shapes are observed in the sodium lines. They have the P Cyg like shape with the discrete absorption components in the blue wing. Their number, shape and radial velocities change with time. The maximum radial velocity reaches -330 km/s, the minimum one is about -50 km/s. The strongest variability was observed in the high velocity components. An analysis of the spectral variability leads us to the following conclusions: 1) The inner layers of accretion disk of MWC 480 reach the star surface: the maximal value of the circumstellar gas rotation velocity obtained from OI 7774 line profile is close to $400-500$ km/s that corresponds approximately to the Keplerian orbit nearest to the star. 2) The high velocity component of the disk wind is formed in this region. It has the highly heterogeneous structure consisting of the dense compact fragments (micro-jets) and reflects probably the unstable structure of magnetic field in the nearest to the star region of the accretion disk. The maximum velocities of the micro-jets exceed only slightly the escape velocity. Therefore the main part of their initial momentum is used to overcome the gravity of the star that causes the deceleration of the gas radial motion. Such a structure of the emitting region agrees with the magneto-centrifugal models of the disk wind where the key role in the gas acceleration is belonged to the intrinsic magnetic field of the accretion disk.

Key words: *stars:spectra - stars:individual:MWC 480*

ЛИТЕРАТУРА

1. P.S.Thé, D. de Winter, M.Pérez, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **104**, 315, 1994.
2. V.Mannings, D.Koerner, A.Sargent, *Nature*, **388**, 555, 1997.
3. V.P.Grinin, P.S.Thé, D. de Winter et al., *Astron. Astrophys.*, **292**, 165, 1994.
4. C.Grady, M.R.Pérez, A.Talavera et al., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **120**, 157, 1996.
5. О.В.Козлова, В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина, *Астрон. ж.*, **77**, 42, 2000.
6. A.Mora, B.Merin, E.Solano et al., (EXPORT) *Astron. Astrophys.*, **378**, 116, 2001.
7. V.P.Grinin, N.N.Kisilev, N.Kh.Minikhulov, G.P.Chernova, N.V.Voshchinnikov, *Astrophys. Space. Sci.*, **186**, 283, 1991.
8. V.P.Grinin, *Astron. Astrophys. Transact.*, **3**, 17, 1992.
9. D.A.Allen, J.P.Swings, *Astron. Astrophys.*, **47**, 293, 1976.
10. M.Jaschek, C.Jaschek, Y.Andrillat, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **97**,

781, 1993.

11. *N.G.Beskovnaya, M.A.Pogodin, A.S.Miroshnichenko, P.S.Thé, I.S.Savanov, N.M.Shakhovskoy, A.N.Rostopchina, O.V.Kozlova, K.S.Kuratov*, *Astron. Astrophys.*, **343**, 163, 1999.
12. *J.A.Valenti, Ch.M.Johns-Krull, J.L.Linsky*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **129**, 399, 2000.
13. *M.A.Pogodin, N.Beskovnaya*, *Astron. Astrophys.*, submitted, 2002.
14. *M.E. van den Ancker, D. de Winter, H.R.E.Tjin a Djie et al.*, *Astron. Astrophys.*, **330**, 145, 1998.
15. *U.Finkenzeller, R.Mundt*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **55**, 109, 1984.
16. *T.Böhm, C.Catala*, *Astron. Astrophys.*, **301**, 155, 1995.
17. *Н.Е.Пискунов*, *Магнетизм звезд*, ред. Ю.В.Глаголевский, И.И.Романюк, Наука, С.-Петербург, 1992, с.92.
18. *N.E.Piskunov, F.Kupka, T.A.Ryabchikova et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **112**, 525, 1995.
19. *D. de Winter, M. van den Ancker, A.Mora et al.*, *Astron. Astrophys.*, **380**, 609, 2001.
20. *Л.В.Тамбовцева, В.П.Гринин, О.В.Козлова*, *Астрофизика*, **42**, 75, 1999.
21. *Л.В.Тамбовцева, В.П.Гринин, В.Роджерс, О.В.Козлова*, *Астрон. ж.*, **78**, 514, 2001.
22. *M.Jaschek, C.Jaschek, Y.Andrillat*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **72**, 505, 1988.
23. *F.Hamann, S.E.Persson*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **82**, 285, 1992.
24. *V.P.Grinin, O.V.Kozlova, A.Natta et al.*, *Astron. Astrophys.*, **379**, 482, 2001.
25. *S.Edwards, T.Ray, R.Mundt*, in "Protostars and Planets" III, eds. E.H.Levy, J.I.Lunine, The Univ. Arizona Press, 1993, p.567.
26. *G.A.Hirth, R.Mundt, J.Solf*, **285**, 929, 1994.
27. *T.Böhm, C.Catala*, *Astron. Astrophys.*, **290**, 167, 1994.
28. *M.Corcoran, T.Ray*, *Astron. Astrophys.*, **321**, 189, 1997.
29. *M.Corcoran, T.Ray*, *Astron. Astrophys.*, **331**, 147, 1998.
30. *C.Grady, B.Woodgate, F.C.Bruhweiler et al.*, *Astrophys. J.*, **523**, L151, 1999.
31. *В.П.Гринин*, *Письма в Астрон. ж.*, **14**, 65, 1988.
32. *В.П.Грикин, А.Н.Ростопчина*, *Астрон. ж.*, **73**, 194, 1996.
33. *F.Shu, J.Najita, E.Ostriker et al.*, *Astrophys. J.*, **429**, 781, 1994.
34. *A.Königl*, in "Disks and Outflows Around Young Stars", Eds. S.Beckwith, J.Staude, A.Quetz, A.Natta, Springer, 1996, p.282.
35. *Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chuntonov*, *Bull. SAO*, **45**, 105, 1998.
36. *С.И.Грачев, В.П.Гринин*, *Астрофизика*, **11**, 33, 1975.
37. *C.Imhoff*, in "The Nature and Evolutionary Status of Herbig Ae/Be Stars", Eds. P.S.Thé, M.R.Pérez, P.J. van den Heuvel, Publ. Astron. Soc. Pacif., **62**, 107, 1994.
38. *C.M.Johns, G.Basri*, *Astrophys. J.*, **449**, 341, 1995.
39. *R.Mundt*, *Astrophys. J.*, **280**, 749, 1984.
40. *D. de Winter, C.A.Grady, M.E. van den Ancker, M.R.Pérez, C.Eiroa*; *Astron. Astrophys.*, **343**, 137, 1999.
41. *A.Mora, A.Natta, C.Eiroa et al.*, *Astron. Astrophys.*, **393**, 259, 2002.
42. *A.Natta, V.Grinin, L.Tambovtseva*, *Astrophys. J.*, **542**, 421, 2000.
43. *B.Reipurth, L.Hartmann, S.J.Kenyon et al.*, *Astron. J.*, **124**, 2194, 2002.