

УДК 524.3, 524.314.3

## СПЕКТРАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ МОЛОДЫХ ГОРЯЧИХ ЗВЕЗД. Ae ЗВЕЗДЫ ХЕРБИГА

О.В. Козлова

## THE SPECTRAL ACTIVITY OF YOUNG HOT STARS. Ae HERBIG STARS

O.V. Kozlova

Ae звезды Хербига – это молодые объекты спектрального класса A, еще не вышедшие на Главную последовательность и окруженные протяженными газопылевыми оболочками. Эти оболочки представляют собой аккреционные диски, над которыми расположена область звездного ветра.

В лекции обсуждается связь между наблюдаемой спектральной активностью Ae звезд Хербига и ориентацией их околосветных дисков. Представлен обзор различных типов спектральной переменности, наблюдаемой у фотометрически активных Ae звезд Хербига и показана связь между этой переменностью и состоянием блеска звезды. На основе данных многолетнего спектрального мониторинга дан анализ структуры внутренних областей околосветных газовых оболочек исследуемых звезд. Полученные результаты сопоставлены с данными численного моделирования околосветных газовых оболочек и процессов аккреции и истечения у молодых звезд.

Ae Herbig stars are the young pre-main-sequence objects of spectral type A surrounded by the extensive gaseous and dust envelopes. These envelopes consist of the accretion disks above which the stellar wind region is situated.

In the lecture there is discussed the connection between observed spectral activity of Ae Herbig stars and the orientation of their circumstellar disks. It is presented the review of various type of the spectral variability observed in the most photometrically active stars and it is shown the connection between this variability and the stellar brightness. On the basis of the long-term spectral monitoring it was made the analysis of the structure of the inner regions of circumstellar envelopes around investigated stars. The received data were also compared to the results of numerical simulations of the circumstellar gaseous envelopes and processes of the accretion and outflows around the young stars.

## Введение

Ae/Be звезды Хербига – это молодые объекты промежуточных масс (от  $2 M_{\odot}$  до  $10 M_{\odot}$ , где  $M_{\odot}$  – масса Солнца), еще не вышедшие на главную последовательность (ГП). Они окружены протяженными газопылевыми оболочками, вещество которых сформировано из остатков родительского облака. В процессе эволюции основная часть оболочки образует протопланетный диск, в котором затем происходит процесс формирования планет. Остальная часть либо аккрецирует на звезду, либо диссипирует (звездный ветер).

Время выхода звезды на ГП, где начинается процесс горения водорода, непосредственно обусловлено ее массой, поэтому среди известных нам молодых объектов абсолютное большинство составляют звезды малых масс (от  $1 M_{\odot}$  и меньше) – звезды типа Т Тельца. Звезды с массами от  $(2 \div 10) M_{\odot}$  эволюционируют намного быстрее, и вероятность застать такую звезду до ее выхода на ГП оказывается значительно меньше.

Отличительными особенностями звезд этого типа являются спектральный класс A или B, наличие ИК-избытков, связанных с излучением горячей околосветной (CS) пыли, наличие эмиссии в спектрах (прежде всего в линии H $\alpha$ , линиях резонансного дублета натрия NaI D и других), присутствие в сильных линиях металлов узких, переменных абсорбций, формирующихся в CS газовой оболочке (так называемые шелл-компоненты).

На расстоянии около 0.5 а. е. и менее от звезды температура диска оказывается достаточной для процесса испарения пылинок. Поэтому внутренние области CS-оболочек свободны от пыли и, как показывают результаты наблюдений (см., например, [1–3]), представляют собой аккреционные диски, над которыми расположена более высокоширотная область

звездного ветра. Наглядно эта модель проиллюстрирована на рис. 1. Темные пятна в аккреционном диске – пылевые конденсации (облака).

Таким образом, в зависимости от ориентации CS-диска по отношению к наблюдателю луч зрения пересекает области, резко различающиеся по своим кинематическим и физическим параметрам, что в значительной мере обуславливает разнообразие наблюдаемых свойств Ae/Be звезд Хербига.

При ориентации «с ребра» (см. рис. 1, CQ Tau) пылевые облака,двигающиеся в диске, могут пересекать луч зрения и экранировать звезду. Это обуславливает сильные нерегулярные ослабления блеска (до  $2-3^m$ ) и признаки нестационарной газовой аккреции в спектре (звезда наблюдается сквозь вещество ее аккреционного диска). Звезды с такой ориентацией дисков получили название звезд типа UX Ori (см. [4–6]).

В случае, когда диск наклонен, между звездой и наблюдателем располагается область звездного ветра

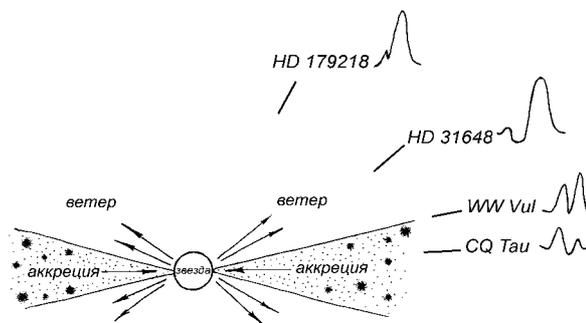


Рис. 1. Модель CS-оболочки, окружающей молодую звезду: аккреционный диск, над которым расположена область интенсивного звездного ветра. Под различными углами к диску показаны возможные направления на наблюдателя, примеры звезд, ориентированных под таким углом и характерные профили эмиссионной линии H $\alpha$ , наблюдаемые при такой ориентации.

(см. рис. 1, HD31648). Фотометрическая переменность в этом случае достаточно слабая ( $\sim 0.1^m$  и меньше), а в спектрах наблюдаются признаки истечения вещества.

В зависимости от ориентации диска меняется и характерный эмиссионный профиль линии  $H\alpha$  (см. [1]). Как видно из рис. 1, в положении диска с ребра эмиссионный профиль двухкомпонентный. При промежуточных углах наклона с синей стороны от эмиссии появляется широкая сильная абсорбция (профиль типа P Cyg). При ориентации с полюса абсорбция исчезает, и профиль представляет собой одиночную эмиссию.

Таким образом, изучение молодых звезд с различной ориентацией CS-дисков позволяет выяснить геометрию излучающей области околозвездной газовой оболочки. Это особенно важно, поскольку отсутствие поверхностной магнитной активности у звезд спектрального класса A и B не позволяет напрямую моделировать для них процессы аккреции и истечения вещества. Современные модели построены на ведущей роли магнитного поля и разработаны для звезд типа T Тельца (см., например, [7–9]). Исключение составляет ситуация, когда молодая звезда представляет собой двойную систему и аккреция может идти без участия магнитного поля (см. [10–11]).

### Спектральная переменность звезд типа UX Ori

Рассмотрим подробнее наблюдаемые проявления спектральной переменности у звезд, диски которых ориентированы с ребра. На рис. 2 показаны профили эмиссионной линии  $H\alpha$  и линии железа  $FeII\ 5018\ \text{\AA}$  для звезды UX Ori. Линия  $H\alpha$  имеет двухкомпонентный профиль с соотношением синего и красного эмиссионных компонент  $V/R > 1$ . Центральная абсорбция часто имеет сложную структуру и смещена в красную сторону. Такое соотношение характерно для вращающихся кеplerовских дисков с радиальной составляющей скорости, направленной к звезде, т. е. аккреционных дисков.

Отличительной чертой спектральной переменности в этом случае является связь с уровнем фотометрической активности: при ослаблении блеска эквивалентная ширина  $EW$  эмиссионных линий увеличивается,

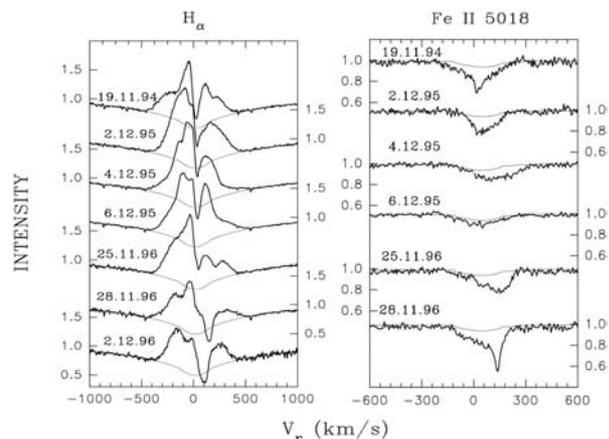


Рис. 2. Пример профилей эмиссионной линии  $H\alpha$  и линии железа  $FeI\ 5018\ \text{\AA}$  в спектре Ae звезды Хербига UX Ori по данным [6]. В линии железа можно видеть появление переменных, узких абсорбций – шелл-компонент.

а поток  $F$ , наоборот, падает (см. [5–6]). На рисунке 3 показана такая переменность для эмиссионной линии  $H\alpha$ , наблюдаемая в спектре CQ Тау.

Как следует из рисунка, одновременно с ростом  $EW$  наблюдается уменьшение глубины центральной абсорбции (в случае CQ Тау центральная абсорбция часто имеет два компонента, изменение глубины которых отмечено пустыми и заполненными кружками). Это приводит к тому, что в моменты наиболее глубоких минимумов центральная абсорбция исчезает и профиль трансформируется в одиночную эмиссию.

Причина такого поведения обусловлена коронаграфическим эффектом [12], вызываемым непрозрачными CS пылевыми облаками: во время процесса затмения звезды облако экранирует только часть более протяженной области, в которой формируется спектральная линия. При этом уровень континуума звезды уменьшается, а относительный вклад CS газовой оболочки растет.

Другой характерной особенностью спектров звезд типа UX Ori являются смещенные в красную сторону CS абсорбционные компоненты линий резонансного дублета натрия  $NaI\ D$ , формирующиеся во внутренних областях аккреционного диска (см. рис. 4).

Кроме описанного выше коронаграфического эффекта, у звезд типа UX Ori наблюдается также спектральная переменность, не связанная с изменением блеска. Она обусловлена возмущениями газовой плотности, электронной температуры и кинематических условий в аккреционном диске (см., например, поведение линий  $HeI\ 5876\ \text{\AA}$  и  $OI\ 7774\ \text{\AA}$  на рис. 5). Причиной таких возмущений является, по-видимому, неоднородная структура внутренних областей аккреционных дисков молодых звезд (см. результаты теоретического моделирования внутренних областей CS газовых оболочек, приведенные в [9] и [13]).

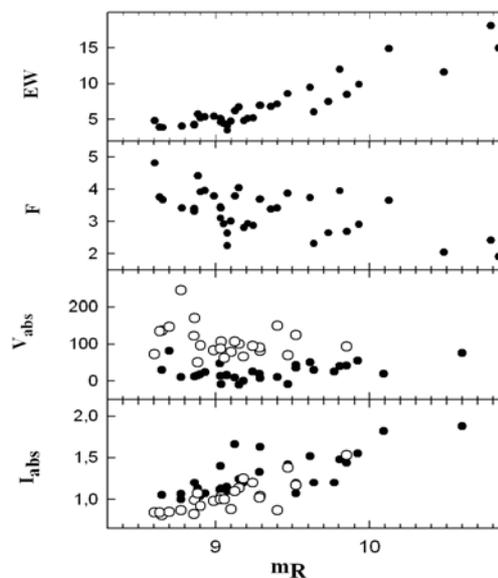


Рис. 3. Связь между параметрами эмиссионной линии  $H\alpha$  и блеском звезды в полосе R для CQ Тау:  $EW$  – эквивалентная ширина эмиссии,  $F$  – поток в линии,  $V_{abs}$  и  $I_{abs}$  – лучевая скорость и глубина абсорбционных компонент (две компоненты центральной абсорбции обозначены пустыми и заполненными кружками).

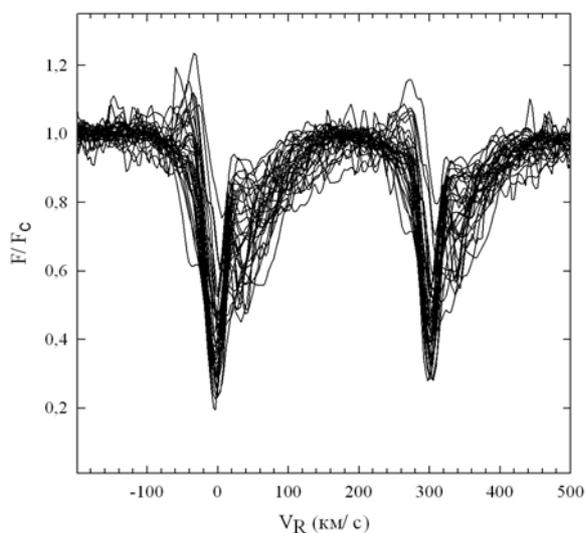


Рис. 4. Линии резонансного дублета Na I D в спектре CQ Tau.

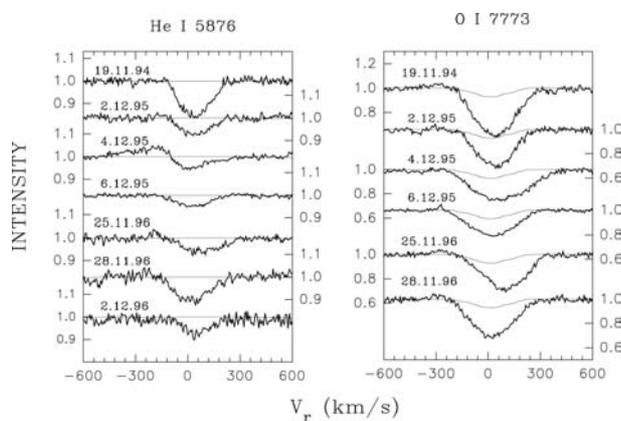


Рис. 5. Переменность линий He I 5876 Å и O I 7773 Å в спектре UX Ori по данным [6], обусловленная изменением физических параметров газа во внутренних областях аккреционного диска.

Ситуация, когда луч зрения скользит по границе между аккреционным диском и звездным ветром, наиболее ярко проявляется на примере Ae звезды Хербига WW Vul (см. рис. 1). Отличительными особенностями спектральной переменности звезды в этом случае являются слабая корреляция параметров эмиссии с блеском и присутствие, наряду с признаками аккреции в линиях H $\alpha$  и резонансного дублета натрия, признаков истечения газа (см. рис. 6).

Переменность лучевой скорости центральной абсорбции эмиссионной линии H $\alpha$  от блеска указывает на то, что максимальная скорость истечения газа (100 км/с и больше) наблюдается в непосредственной близости от звезды. Этот вывод хорошо согласуется с данными моделирования [7–9], где главную роль играет магнитное поле звезды и/или диска.

Поведение смещенных в синюю сторону линий резонансного дублета Na I D (см. рис. 6) также указывает на то, что они формируются в дисковом ветре, проецирующемся на луч зрения и имеющем неоднородную структуру.

Существование подобных структур предсказывается в некоторых работах по моделированию истечения газа у молодых звезд (см., например, [9]) и

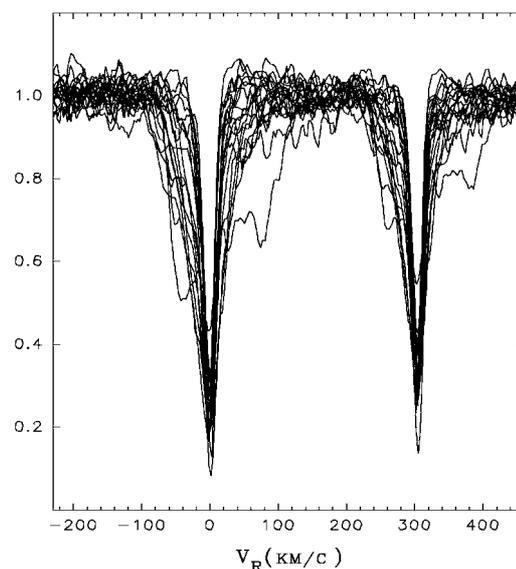
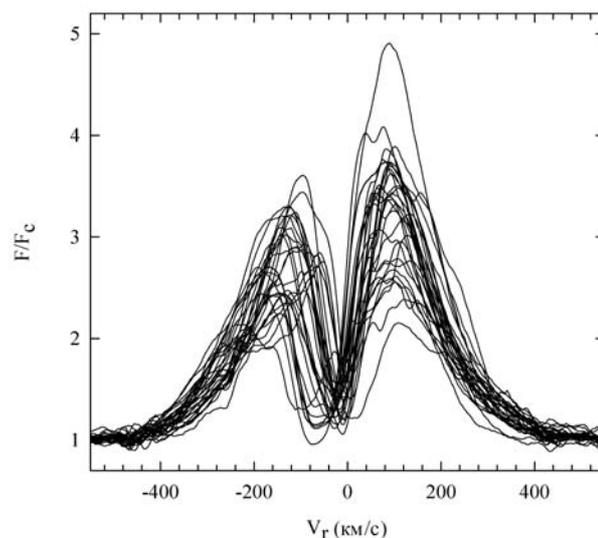


Рис. 6. Характер переменности эмиссионной линии H $\alpha$  (слева) и линий резонансного дублета натрия Na I D (справа) для звезды WW Vul.

связывается с присутствием магнитного поля в диске и/или на поверхности звезды. На рис. 7 показан процесс формирования и развития таких структур для молодой звезды с массой, равной солнечной, и имеющей магнитное поле порядка 1 кГс.

#### Многолетняя спектральная переменность звезд типа UX Ori

Существование многолетней спектральной переменности отражает динамику процессов, протекающих в околозвездных газовых оболочках, и представляет значительный интерес для понимания структуры аккреционных дисков и ветра у молодых звезд. С другой стороны, теоретически не предложено каких-либо механизмов для объяснения такой переменности, кроме возможной двойственности звезды [10–11]. Таким образом, организация многолетних спектральных наблюдений является на данный момент единственной возможностью исследования этого явления.

Значительная фотометрическая активность звезд типа UX Ori обычно не позволяет исследовать их переменность на многолетней временной шкале. Однако

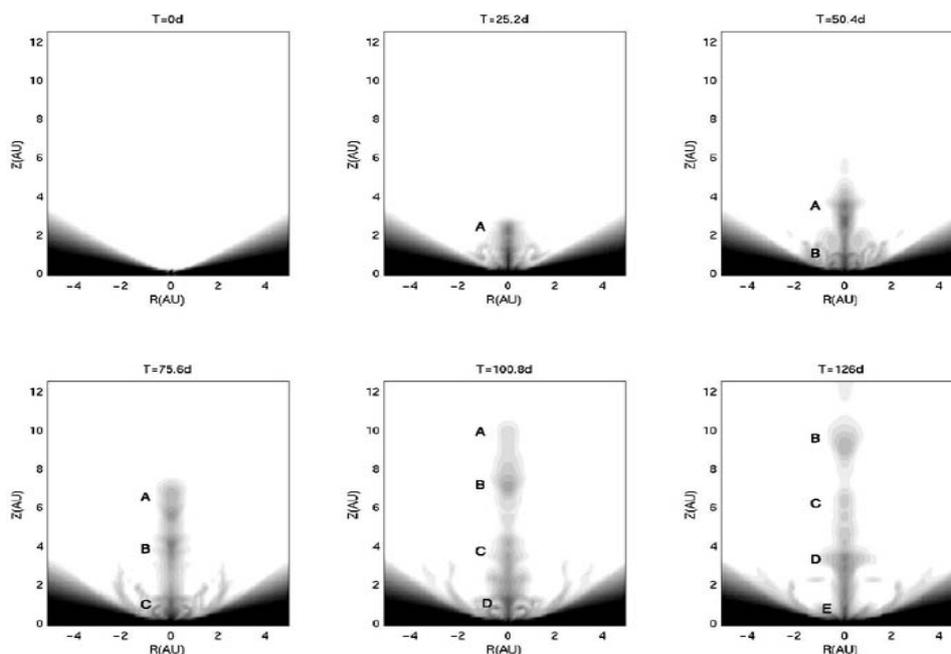


Рис. 7. Структура ветра у молодых звезд по данным работы [9].

в случае, когда параметры эмиссионной линии не показывают значимой зависимости от блеска, это удается сделать.

На рис. 8 показана зависимость лучевой скорости красного эмиссионного компонента линии  $H\alpha$  ( $V_{red}(H\alpha)$ ) и красной границы абсорбционных линий  $NaI D$  ( $V_{red}(Na)$ ) от юлианской даты (данные величины характеризуют максимальную скорость движения газа к звезде на луче зрения). Полученные результаты показывают, что амплитуда этой скорости меняется на шкале времени около 700 суток. Это означает, что на шкале времени около двух лет происходит переменность кинематических условий в аккреционном диске звезды. Причины такой переменности не совсем ясны. Однако некоторые факты указывают на возможную связь с крупномасштабными неоднородностями, наблюдаемыми в газопылевых оболочках, и обусловленными процессами планетообразования, а также диссипацией пылевых облаков в аккреционном диске (см., например, [14–15]).

**Спектральная переменность звезд с признаками ветра**

В случае большего угла наклона CS-диска по отношению к наблюдателю луч зрения пересекает непосредственно область звездного ветра. Это обуславливает появление спектроскопических признаков анизотропного истечения газа в линиях  $H\alpha$ ,  $NaI D$  и ряде других. Спектральная переменность линий обусловлена вращательной модуляцией газа в аккреционном диске (эмиссионные компоненты) и в ветре (абсорбционные компоненты) и происходит на шкале времени от нескольких часов до нескольких суток.

Рассмотрим этот случай подробнее на примере звезды HD 31648 (см. рис. 1). В линиях резонансного дублета натрия  $Na I D$  отмечается мультикомпонент-

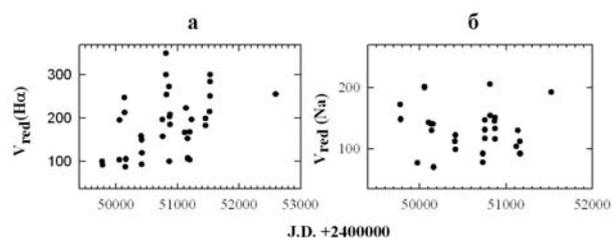


Рис. 8. Характер многолетней переменности CQ Тау: изменение лучевой скорости красного эмиссионного компонента линии  $H\alpha$  (слева) и красной границы CS-абсорбции  $NaI D$  (справа).

ная структура смещенных в синюю сторону переменных абсорбционных линий, формирующихся в области ветра (рис. 9). Характер их переменности, а также быстрая переменность линий  $HeI 5876 \text{ \AA}$  и  $OI 7774 \text{ \AA}$  показывают, что источником звездного ветра являются внутренние слои аккреционного диска, непосредственно примыкающие к звезде. При этом высокоскоростная компонента ветра представляет собой совокупность отдельных фрагментов вещества (микроджетов), которые выбрасываются из этой области, предположительно, под действием магнитоцентробежного механизма. Начальные скорости микроджетов, не намного превышают скорость убегания у поверхности звезды, в результате чего формируется анизотропное истечение газа с замедлением наружу.

Этот результат аналогичен полученному для WW Vul и указывает на возможное присутствие в диске и/или на поверхности звезды магнитного поля.

*Многолетняя переменность звезд с признаками истечения вещества*

На рис. 10 показана переменность  $EW$  и интенсивности  $I$  эмиссионной линии  $H\alpha$  на шкале времени около 12 лет для Ae звезды Хербига HD 31648. Данные

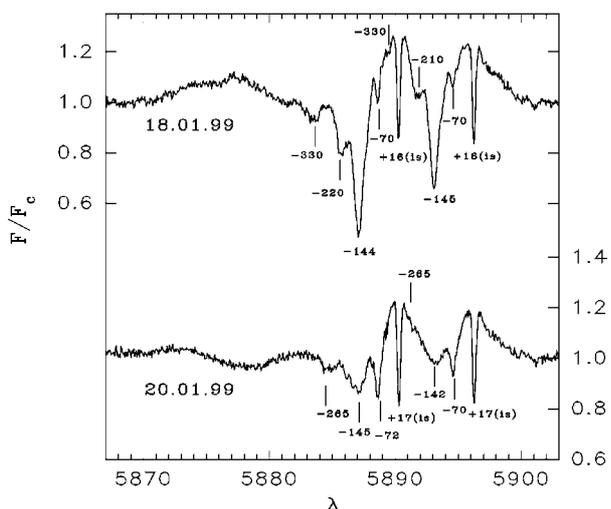


Рис. 9. Мультикомпонентная структура смещенных в синюю сторону абсорбционных компонент линий резонансного дублета NaI в спектре звезды HD 31648. С левой стороны – линия гелия HeI 5876 Å, профиль которой меняется на шкале времени несколько часов.

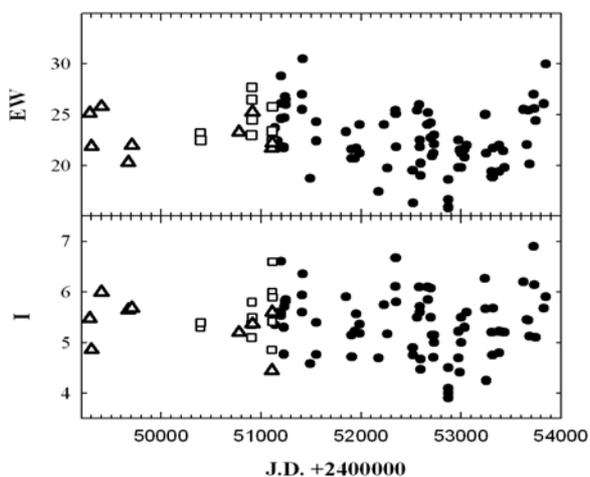


Рис. 10. Изменение эквивалентной ширины  $EW$  и интенсивности  $I$  эмиссионной линии Na на многолетней временной шкале в спектре HD 31648 [16]. Треугольниками показаны данные архива Ritter обсерватории университета Толедо. Пустыми квадратами – данные Бескровной и Погодина (A&A, 414, 955).

наблюдений показывают, что структура аккреционного диска и ветра у этой звезды не является стабильной: существуют физические механизмы, обуславливающие перестройку внутренней структуры CS газовой оболочки звезды с характерным временем около трех лет. Какие именно механизмы могут вызывать подобную перестройку, сказать сложно. Это может быть, например, влияние планеты-гиганта, формирующейся в относительной близости от звезды. Для ответа на этот вопрос необходимы дальнейшие наблюдения в наиболее широкой спектральной области.

Результаты наблюдений Ae звезды Хербига HD 179218 также показывают наличие сложной многолетней переменности параметров эмиссионной линии Na, таких как  $EW$ ,  $I$  и синяя граница эмиссионного профиля на уровне интенсивности  $I = 1.5 V_{\text{blue}}(I = 1.5)$  (рис. 11). Поскольку угол наклона этой звезды близок к ориентации «с полюса» (см. рис. 1), обнаруженная

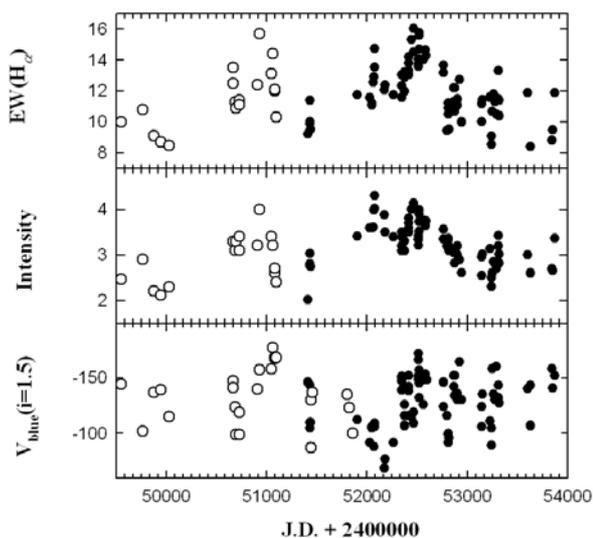


Рис. 11. Изменение эквивалентной ширины  $EW$  и интенсивности  $I$  эмиссионной линии Na на многолетней временной шкале в спектре звезды HD 179218. Пустыми кружками отмечены данные [17] и архива Ritter обсерватории университета Толедо.

переменность может быть обусловлена изменением темпа аккреции и истечения газа на шкале времени порядка 2000 суток.

Как и в случае HD 31648, полученные результаты не вписываются в данные моделирования аккреционных дисков и ветра для молодых одиночных звезд [7–9]. Однако в случае молодой двойной звезды по данным [10–11] такую переменность можно объяснить изменением темпа аккреции на шкале времени, соответствующей орбитальному периоду системы.

### Выводы

Спектральная активность Ae звезд Хербига в значительной степени определяется ориентацией их околосредных газовых оболочек по отношению к наблюдателю и обусловлена пространственно-кинематической структурой их внутренних областей, представляющих собой аккреционный диск, над которым расположена протяженная область звездного ветра. Эти результаты полностью аналогичны данным, полученным для маломассивных молодых звезд типа Т Тельца, и указывают на то, что у горячих молодых звезд важная роль в процессе аккреции и истечения газа также должна принадлежать магнитному полю. Последние работы по точным измерениям магнитных полей у молодых звезд [18] подтверждают этот вывод.

С другой стороны ряд особенностей спектральной переменности на многолетней временной шкале не вписывается в представленную схему и требует дальнейшего исследования и анализа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринин В.П., Ростопчина А.Н. // АЖ. 1996. № 73. С. 194.
2. Гринин В.П., Козлова О.В., Чунтонов Г.А. // Астрофизика. 2003. № 46. С. 265.
3. Waters L.B.F.M., Waelkens C. // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1998. V. 36. P. 233.

4. Grinin V.P., The P.S., de Winter D., et al. // *Astron. Astrophys.* 1994. V. 292. P. 165.
5. Козлова О.В., Гринин В.П., Ростопчина А.Н. // *АЖ*. 2000. № 44. С. 36.
6. Grinin V.P., Kozlova O.V., Natta A., et al. // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 379. P. 482.
7. Konigl A. // *Astrophys. J.* 1991. V. 370. P. L39.
8. Shu F., Najita J., Ostraiker E., et al. // *Astrophys. J.* 1994. V. 429.b P. 781.
9. Goodson A.P., Böhm K.H., Wingle R.M. // *Astrophys. J.* 1999. V. 524. P. 142.
10. Artymowicz P., Lubow S.H. // *Astrophys. J.* 1994. V. 421. P. 651.
11. Artymowicz P., Lubow S.H. // *Astrophys. J.* 1996. V. 467. P. L77.
12. Grinin V.P., Tambovtseva L.V. // *Astron. Astrophys.* 1995. V. 293. P. 396.
13. Goodson A.P., Wingle R.M. // *Astrophys. J.* 1999. № 524. С. 159.
14. Гринин В.П., Ростопчина А.Н., Шаховской Д.Н. // *Письма в АЖ*. 1988. № 24. С. 925.
15. Grinin V.P., Kozlova O.V., The P.S., Rostopchina A.N. // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 309. P. 474.
16. Козлова О.В. // *Астрофизика (в печати)*.
17. Miroshnichenko A.S., Mulliss C.L., Bjorkman K.S., et al. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1999. V. 302. P. 612.
18. Hubrig S., Yudin R.V., Shöller M., Pogodin M.A. // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 486. P. 1089.

*Крымская астрофизическая обсерватория, Крым*