

УДК: 524.3:520.82

ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И СКОРОСТИ
ВРАЩЕНИЯ ЗВЕЗД ТИПА UX Ori И РОДСТВЕННЫХ
ИМ ОБЪЕКТОВВ.П.ГРИНИН^{1,2}, О.В.КОЗЛОВА¹

Поступила 17 февраля 2000

Выполнен анализ скоростей вращения молодых звезд типа UX Ori и родственных им объектов. Показано, что существует слабо выраженная, но статистически значимая корреляция между $v \sin i$ и амплитудами фотометрической переменности рассматриваемых звезд. Она отражает тот факт, что переменность блеска звезд этого типа определяется в основном изменениями колонковой плотности околозвездной пыли на луче зрения. Последняя в свою очередь зависит от ориентации околозвездных дисков и максимальна в тех случаях, когда диски ориентированы по отношению к наблюдателю с ребра или под небольшим углом к лучу зрения.

1. *Введение.* Переменность блеска является одним из наиболее ярких наблюдательных проявлений молодости звезд. Причины, порождающие ее, могут быть весьма разнообразны. Например, мощные и продолжительные вспышки звезд типа FU Ori объясняют интенсивной аккрецией околозвездного вещества ($\dot{M}_a \approx 10^{-5} - 10^{-6} M_\odot/\text{год}$), при которой светимость аккреционного диска превышает светимость самой звезды [1]. С нестационарной аккрецией газа связывают также и менее мощные вспышечно-подобные события, наблюдаемые у звезд типа Т Тельца. Источниками дополнительного излучения в этом случае являются горячие пятна, образующиеся в местах контакта падающего газа с поверхностью звезды [2,3].

Другой причиной переменности блеска молодых звезд является переменная околозвездная экстинкция. По данным Строма и др. [4] около 70% молодых звезд окружены пылевыми дисками. В процессе эволюции околозвездного вещества, роста планетозималей и формирования протопланет распределение околозвездного вещества становится все более неоднородным. В результате мгновенное значение колонковой плотности пыли на луче зрения может быстро меняться со временем. По этой причине данный тип переменности в той или иной мере характерен, по-видимому, для многих молодых звезд, окруженных газопылевыми дисками.

В наиболее отчетливой форме он наблюдается у звезд типа UX Ori, известных также в астрофизической литературе как звезды с непериодическими алголеподобными ослаблениями блеска. Большую часть этого подкласса молодых

звезд составляют звезды промежуточных масс Ae/Be Хербига, причем в основном спектральных классов A [5,6]. Спорадические минимумы блеска этих звезд, достигающие 2-3 звездных величин, обусловлены поглощением излучения звезд околозвездными пылевыми облаками, пересекающими время от времени луч зрения. В эти моменты наблюдается рост линейной поляризации, обусловленный тем обстоятельством, что по мере ослабления прямого излучения звезды увеличивается вклад излучения, рассеянного околозвездной пылью [7-9]. Это излучение возникает в значительно большем объеме околозвездного пространства по сравнению с тем, который может быть закрыт от наблюдателя пылевыми облаками. Поэтому при покрытии звезды пылевым облаком интенсивность поляризованного рассеянного излучения остается неизменной или меняется незначительно, тогда как прямое (неполяризованное) излучение звезды ослабляется при прохождении сквозь облако. Ослабления блеска звезд типа UX Ori сопровождаются рядом других интересных явлений, таких, как эффект "поголубения", увеличение эквивалентных ширин эмиссионных линий и изменение их профилей, которые также естественным образом вписываются в модель переменной околозвездной экстинкции [7,10].

В ходе патрульных наблюдений линейной поляризации и блеска звезд типа UX Ori выяснилось, что в глубоких минимумах, когда доминирует рассеянное излучение, его поляризация оказывается весьма высокой, порядка 5-7%. Это означает, что околозвездная пылевая оболочка не только сильно сплюснута, но и "оптимальным" образом ориентирована по отношению к наблюдателю: ребра или под небольшим углом к лучу зрения. На основании этого в [8] было высказано предположение, что фотометрическая активность звезд типа UX Ori тесно связана с их пространственной ориентацией и максимальна в тех случаях, когда угол i между осью симметрии околозвездного диска и лучом зрения близок к $\pi/2$. Это предположение было поддержано результатами статистического анализа профилей линии H_α [11,12]: оказалось, что большая часть двухкомпонентных профилей, расширенных вращением околозвездных газовых оболочек (соосных с пылевыми дисками), наблюдается у фотометрически активных звезд Ae/Be Хербига, тогда как профили типа Р Лебеда, указывающие на истечение вещества, наблюдаются преимущественно у фотометрически спокойных звезд. Поле скоростей такого типа согласуется с современными моделями дисковой аккреции на молодые объекты, согласно которым часть вещества из аккреционного диска ускоряется при взаимодействии с магнитосферой звезды и образует биконический звездный ветер (см. обзор Кирилла [13] и цитированные в нем работы). Недавно Натта и др. [14], проанализировав массы пылевых оболочек звезд Ae Хербига, полученные на основе наблюдений в миллиметровом диапазоне, подтвердили вывод о том, что основным фактором, определяющим уровень активности звезд, является ориентация их пылевых оболочек относительно луча зрения.

Естественно предположить, что оси вращения молодых звезд и окружающих их околозвездных дисков совпадают. Поэтому, если фотометрическая активность звезд зависит от ориентации их околозвездных дисков относительно наблюдателя, то скорости вращения фотометрически активных звезд должны быть в среднем выше, чем у фотометрически спокойных звезд тех же спектральных типов. Такой анализ был недавно выполнен в статьях Грэди и др. [15] и Хербста и Шевченко [16], и его результаты оказались противоречивыми: согласно [15] скорости вращения $\nu \sin i$ звезд Ae/Be Хербига с признаками звездного ветра (т.е. фотометрически малоактивных), действительно, в среднем меньше, чем у фотометрически активных звезд тех же спектральных типов, тогда как в [16] никакой корреляции между амплитудами изменений блеска звезд и скоростями их вращения не обнаружено.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы установить причины этих разногласий и выяснить, есть ли на самом деле связь между фотометрической активностью звезд Ae/Be Хербига и скоростями их вращения.

2. *Выбор объектов и анализ данных.* С этой целью мы проанализировали списки звезд, использованные в указанных выше статьях, и в целях большей однородности исходного материала отобрали только звезды Ae/Be Хербига спектральных классов A (точнее, от B8 до F0) с известными $\nu \sin i$ и амплитудами фотометрической активности Δm . Согласно [14] подобная селекция по спектральным типам необходима, поскольку диапазон светимостей звезд Хербига при переходе от ранних Be-звезд к поздним Ae-звездам перекрывает почти три порядка, что существенным образом сказывается на свойствах пылевых оболочек, окружающих эти звезды. Возможно, именно по этой причине ранние Be-звезды Хербига вообще не показывают заметной фотометрической активности (см. ниже).

2.1. *Амплитуды фотометрической активности звезд.* В табл.1 приведены основные характеристики отобранных звезд: спектральный тип, амплитуда переменности в полосе V и скорость вращения $\nu \sin i$, а также источники, из которых они взяты. Звездочкой отмечены пять объектов из списка [16], амплитуды переменности которых заметно отличаются от приведенных в указанной статье. В случае TOi амплитуда переменности по данным [16] составляет рекордную для звезд этого типа величину: $5.^m7$ и, по-видимому, сильно завышена за счет двух выбросов на кривой блеска этой звезды (см. рис.13 в [16]). Природа подобных выбросов, наблюдаемых иногда на кривых блеска переменных звезд, не вполне ясна, и есть основания предполагать, что часть из них обусловлена помехами в процессе наблюдений. Поэтому при оценке амплитуд фотометрической активности молодых звезд такие выбросы следует отбрасывать. Мы сделали такую коррекцию для TOi и еще для одной звезды Ae/Be Хербига - RR Tau, на кривой блеска которой также зарегистрированы два вспышечноподобных выброса [17].

Таблица 1

СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗВЕЗД ТИПА UX Ori И РОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

N	Звезда	Сп. тип	ΔM	Источник	$v \sin i$ км/с	Источник
1	WW Vul	A0-A3	2.15	1	150	3
2	VV Ser	A0	3.20*	1	85	10
3	BF Ori	A5	3.05	4	60	2
4	UX Ori	A3	3.93	4	140	3
5	CQ Tau	A8	2.24	4	90	3
6	RR Tau	B8-A3	3.75*	1	140	3
7	SV Cep	A0	1.46	1	180	2
8	VX Cas	A0-A3	1.19	1	150	2
9	MWC 480	A2	0.05	1	85	11
10	HD 179218	B9	0.02	1	60	2
11	AB Aur	A0	1.25*	6	80	5
12	HD 150193	A0	1.28	4	85	3
13	HD 163296	A8	1.70	4	120	9
14	HD 250550	B9	2.32	4	70	10
15	HK Ori	A	2.21*	6	175	10
16	KK Oph	A0	3.83	4	85	10
17	LkHa 208	F0	0.85	4	85	10
18	T Ori	A3	3.70*	4	130	5
19	V 586 Ori	A2	1.77	4	160	5
20	HD 36112	A8	0.18	7	60	7
21	HD 190073	A0	0.00	1	10	8

Примечание к таблице. 1 - база данных КраО; 2 - настоящая статья; 3 - Гринин и др. [22]; 4 - Хербст и Шевченко [16]; 5 - Бем и Катала [25]; 6 - Хербиг и Белл [18]; 7 - Бескровная и др. [26]; 8 - Чунтонов (частное сообщение); 9 - Финкенцеллер [27]; 10 - Хилленбрант [28]; 11 - Козлова и Гринин [29].

В случае АВ Aшг и НК Ori амплитуды переменности взяты из каталога Хербига и Белл [18], поскольку известно, что в прошлом эти звезды были значительно активнее, чем в современную эпоху. В случае VV Ser амплитуда переменности также заметно выше, чем по данным [16]. Это связано с тем, что в 1998г. у этой звезды наблюдался исключительно глубокий минимум [19], во время которого блеск звезды упал до рекордно низкого уровня (около 14.^m8). Значение Δm в табл.1 получено с учетом этого результата.

3. *Скорости вращения.* Из списка [16] была исключена звезда V380 Ori, спектр которой, как показал еще Хербиг [20], богат сильными эмиссионными линиями, блендирующими фотосферные линии поглощения. Это затрудняет не только оценку скорости вращения звезды, но и определение ее спектрального типа.

Мы исключили также звезду Ae Хербига TY Cга, поскольку она является главным компонентом тесной двойной системы с очень коротким орбитальным периодом (около 3^d). Вращение таких звезд обычно синхронизовано с

орбитальным вращением, а в случае TY Cgr вращение является даже субсинхронным [21]. Поэтому, хотя данная система является затменной и, следовательно, ее орбита и окружающий пылевой диск не могут быть сильно наклонены по отношению к лучу зрения (что подтверждает и довольно высокий уровень фотометрической активности этой звезды), малая скорость вращения главного компонента TY Cgr (менее 15 км/с) будет в статистическом анализе давать ложный эффект и соответствовать объектам, наблюдаемым с полюса.

Скорость вращения BF Ori в табл.1 представляет собой среднее значение, основанное на данных [22] (40 км/с) и [28] (80 км/с). Мы включили в табл.1 три звезды типа UX Ori: WW Vul, VX Cas и SV Ser, фотометрическая активность которых довольно хорошо изучена и скорости вращения недавно определены в [22] и в настоящей статье по спектрам, полученным с помощью Nordic Optical Telescope. При этом значения $v \sin i$ оценивались путем подгонки наблюдаемых спектров синтетическими спектрами, расширенными вращением звезды. Чтобы избежать ошибок, обусловленных присутствием в спектрах звезд линий поглощения, возникающих в околосветных газовых оболочках, скорости вращения оценивались по слабым абсорбционным линиям, наименее блендированным шелл-компонентами.

Кроме указанных выше трех звезд типа UX Ori в табл.1 включены три фотометрически спокойных звезды Ae Хербига: MWC 480, HD 190073 и HD 179218, которые также отсутствуют в [16]. Скорость вращения MWC 480 определена недавно в [29] по линиям Si II 6347 и 6371 Å. Значения $v \sin i$ для HD 190073 и HD 179218 были любезно предоставлены нам Г.А.Чунтоновым. Следует отметить, что эти две звезды лишь недавно включены Малфайт и др. [23] в списки звезд Ae/Be Хербига. Относительно MWC 480 известно (Мэннингс и Сарджент [24]), что эта звезда окружена протопланетным диском, плоскость которого наклонена под большим углом (около 60°) к лучу зрения.

4. *Результаты.* На рис.1 представлены скорости вращения звезд из табл.1 вместе с соответствующими амплитудами фотометрической переменности. Видно, что чем больше амплитуда изменений блеска звезды, тем в среднем больше значение $v \sin i$. Коэффициент корреляции между этими двумя параметрами равен 0.38. Соответствующий критерий значимости этой корреляции равен 0.9.

По-видимому, трудно ожидать более высокой корреляции между этими двумя величинами, поскольку, во-первых, скорости вращения самих звезд характеризуются довольно большим разбросом. Это следует из анализа скоростей вращения нормальных А-звезд главной последовательности, эволюционными предшественниками которых являются Ae-звезды Хербига. Как известно, среди них есть как звезды с быстрым вращением, так и медленно вращающиеся Ар-звезды. Во-вторых, угол раствора околосветных дисков

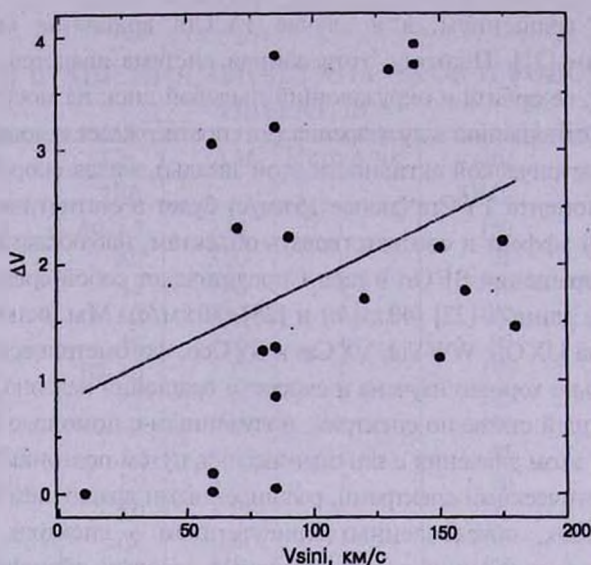


Рис.1. Скорости вращения $v \sin i$ звезд типа UX Ori и родственных им объектов и амплитуды их фотометрической переменности по данным табл.1. Коэффициент корреляции между этими двумя параметрами равен 0.38 при уровне значимости около 0.9.

звезд типа UX Ori не является малым. По оценкам Натта и др. [30], основанным на фотометрических данных спутника Hipparcos, он составляет в среднем около 60 градусов. Это означает, что фотометрически активным объектом может быть звезда, ось вращения которой наклонена к лучу зрения под углом $\approx 30^\circ$ и, соответственно, наблюдаемая скорость вращения которой вдвое меньше ее истинного значения. Кроме того, большой разброс точек на рис.1 может быть частично обусловлен разбросом значений массы околосветных пылевых дисков, который, как показано в [14], достигает одного порядка величины.

5. Обсуждение. Таким образом, результаты нашего анализа подтверждают вывод Грэди и др. [15] о существовании корреляции между скоростями вращения звезд Ae/Be Хербига $v \sin i$ и уровнем их фотометрической активности. Причина противоположного вывода, сделанного в статье Хербста и Шевченко [16], понятна и из проведенного выше анализа использованного этими авторами исходного наблюдательного материала. Он весьма неоднороден в том смысле, что включает звезды всех спектральных типов, в том числе и ранние Be-звезды Хербига, среди которых практически нет фотометрически активных объектов, но зато есть звезды с большими скоростями вращения.

Низкий уровень фотометрической активности ранних Be-звезд Хербига был впервые отмечен еще Финкензеллером и Мундтом [31] и подтвержден на большем статистическом материале в [5]. Поскольку эти звезды также окружены пылевыми оболочками, о чем свидетельствуют их ИК-избытки

излучения, то этот наблюдательный факт не вполне понятен с точки зрения модели околозвездной переменной экстинкции и на первый взгляд даже ей противоречит.

На самом деле, как мы предполагаем, отсутствие глубоких минимумов блеска у ранних Ве-звезд Хербига обусловлено их высокой светимостью и, как следствие этого, отсутствием пыли в ближайших окрестностях звезд. Например, радиус зоны испарения пыли для таких звезд порядка 10 а.е., что превышает размер планетной системы вокруг Солнца. С другой стороны, как показывает анализ синхронных наблюдений линейной поляризации и блеска звезд типа UX Opi [9], глубокие минимумы этих звезд обусловлены в основном близкими прохождениями пылевых облаков от звезды на расстояниях порядка 2-3 а.е. Это позволяет понять, почему нет алголеподобных минимумов у ранних Ве-звезд Хербига: пылевые облака, приближаясь к такой звезде, испаряются еще находясь на большом расстоянии от звезды.

6. Заключение. Проведенный выше анализ скоростей вращения звезд типа UX Opi и родственных им объектов показывает наличие слабой, но статистически значимой корреляции между скоростью вращения звезд и уровнем их фотометрической активности: чем больше амплитуда изменений блеска, тем в среднем больше скорость вращения звезды. Такая корреляция согласуется с моделью переменной околозвездной экстинкции и отражает тот факт, что фотометрически наиболее активные звезды этого типа - это такие, которые наблюдаются непосредственно сквозь околозвездные газопылевые диски.

Авторы искренне благодарны Г.А.Чунтонову и Л.Хилленбрант за предоставление неопубликованных данных о скоростях вращения ряда звезд Ae/Ве Хербига и Б.Хербсту за возможность ознакомиться с материалами статьи [16] до публикации. Мы также благодарны Д.Н.Шаховскому за помощь при подготовке настоящей статьи и М.А.Погодину за полезные замечания. Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 99-02-18520 и государственной программы "Астрономия".

¹ Крымская астрофизическая обсерватория, Украина

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия

PHOTOMETRIC ACTIVITY AND ROTATION VELOCITIES OF THE UX Ori TYPE STARS AND RELATED OBJECTS

V.P.GRININ, O.V.KOZLOVA

The rotation velocities of the UX Ori type stars and related objects are analysed. It is shown that the weak, but statistically real correlation exists between $v \sin i$ and amplitudes of the photometric variability of the investigated stars. This correlation agrees with the suggestion that the brightness variability of these stars is caused by the variations of the column density of circumstellar (CS) dust and maximal in those cases when CS disks are oriented edge-on or have a small inclination angle relatively to the line-of-sight.

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.Hartmann, S.J.Kenyon*, *Astrophys. J.*, **299**, 462, 1985.
2. *В.П.Гринин*, *Астрофизика*, **16**, 243, 1980.
3. *J.Bouvier, C.Bertout*, *Astron. Astrophys.*, **158**, 149, 1989.
4. *S.E.Strom, S.Edwards, M.F.Skrutskie*, in "Protostars and Planets, III", Eds. E.H.Levy, Lunine (Tucson, Univ. Arisona Press), 1993, p.837.
5. *P.S.Thé*, in "The Nature and Evolutionary Status of Herbig Ae/Be Stars", Eds. P.S.Thé, M.P.Hetz and G.P.L. van den Herwe, PASPC, **Q, 2**, 1994.
6. *W.Herbst. et al.*, *Astron. J.*, **108**, 1906, 1994.
7. *В.П.Гринин*, *Письма в Астрон. ж.*, **14**, 65, 1988.
8. *V.P.Grinin, N.N.Kiselev, N.Kh.Minikhulov, G.P.Chernova, N.V.Voshchinnikov*, *Ap&SS*, **186**, 283, 1988.
9. *V.P.Grinin*, *PASPC*, **62**, 63, 1994.
10. *V.P.Grinin, P.S.The, D.de Winter et al.*, *Astron. Astrophys.*, **292**, 165, 1994.
11. *V.P.Grinin*, *Astron. Astrophys. Trans.*, **3**, 17, 1992.
12. *В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина*, *Астрон. ж.*, **73**, 194, 1996.
13. *A.Königl*, in "Disks and Outflows Around Young Stars", Eds. S.Beckwith, J.Staude, A.Quetz, A.Natta, 1996, p.282.
14. *A.Natta, V.P.Grinin, V.Mannings, H.Ungerechts*, *Astrophys. J.*, **491**, 885, 1997.
15. *C.Grady, M.R.Pérez, A.Talavera et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **120**, 157, 1996.
16. *W.Herbst, V.S.Shevchenko*, *Astron. J.*, **112**, 765, 1998.
17. *A.N.Rostopchina, V.P.Grinin, A.Okazaki et al.*, *Astron. Astrophys.*, **327**, 145, 1997.
18. *G.H.Herbig, R.K.Bell*, "Third Catalogue of Emission-line stars of the Orion

Population", Lick Observ. Bull. N 1111, 1989.

19. *А.Н.Ростопчина, В.П.Гринин, Д.Н.Шаховской*, Астрон. ж. (в печати).
20. *G.H.Herbig*, Astrophys. J., Suppl. Ser., 4, 337, 1960.
21. *B.W.Casey, R.D.Mathieu, N.B.Suntzeff et al.*, Astron. J., 105, 2276, 1993.
22. *V.P.Grinin et al.*, 2000 (in preparation).
23. *K.Malfait, E.Bogaert, C.Waelkense*, Astron. Astrophys., 331, 211, 1998.
24. *V.Mannings, A.Sargent*, Astrophys. J., 490, 792, 1998.
25. *T.Bohm, C.Catala*, Astron. Astrophys., 301, 155, 1996.
26. *N.G.Beskrovnaja, M.A.Pogodin, A.S.Miroshnichenko, P.S.The et al.*, Astron. Astrophys., 343, 163, 1999.
27. *U.Finkenzeller*, Astron. Astrophys., 151, 340, 1985.
28. *L.Hillenbrant*, Private communication.
29. *O.V.Kozlova, V.P.Grinin*, Submitted to Astron. Astrophys., 2000.
30. *A.Natta, V.P.Grinin, V.Mannings*, in "Protostars and Planets, IV", 2000 (in press).
31. *U.Finkenzeller, R.Mundt*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 55, 109, 1984.