

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ЗАПЯТНЕННОСТИ КЛАССИЧЕСКОЙ $RS CV_n$ СИСТЕМЫ $UX A_g$

И.Ю.АЛЕКСЕЕВ

Поступила 27 июня 2013

Принята к печати 30 апреля 2014

В работе показано, что гипотеза о комплексном - холодные пятна и горячие факелы - строснии активных областей на $UX A_g$ хорошо воспроизводит фотометрическое поведение звезды. Согласно моделированию, пятна холоднее спокойной фотосферы на 1300 К, в то время как факелы горячее фотосферы на 750 К. Такие оценки хорошо согласуются с результатами доплеровского картирования звезды, с расчетами фотометрического поведения и наблюдением молекулярных полос OH. Эффективная площадь запятненных областей доходит до половины полной поверхности звезды. При этом, согласно нашим оценкам, факелы составляют около одной трети площади пятен. Временной ход блеска звезды и эффективной площади пятен вероятно циклически с характерным временем 8-9 лет. Переключения активных долгот при этом не показывают явной цикличности.

Ключевые слова: *звезды: RS CVn; звезды: UX A_g; запятненность*

1. *Введение.* Общеизвестно, что запятненные области на Солнце окружены областями повышенной яркости - горячими факелами. Однако при фотометрических исследованиях запятненных звезд обычно принимается простая двухкомпонентная модель - спокойная фотосфера и тень пятна. В частности, такая концепция была применена для разработанной в КраО зональной модели. Но в некоторых случаях такая модель оказывается недостаточной. Так, в нашей работе [1] было показано, что у активной звезды $UX A_g$ наблюдается посинение во всех цветах при снижении блеска переменной, что абсолютно нехарактерно для модели типичной запятненной звезды. При этом существующие доплеровские карты звезды [2] говорят о наличии на ней больших холодных пятен.

Для объяснения фотометрических аномалий $UX A_g$ в литературе рассматривалось два механизма: преобладание при росте запятненности света от более горячего G компонента [3-5]; и гипотеза, что темные пятна сопровождаются яркими факелами [6]. Учитывая довольно сильную переменную поляризацию и радиоизлучение системы, не исключался и вклад находящегося между компонентами перетекающего вещества [1].

Аарум-Ульвас и Енгвольд [7] показали, что наличие факелов действительно может объяснить эффект поглубления в цвете $B-V$, и отказались от гипотезы вклада более горячего компонента. Более того, результаты

доплеровского картирования, выполненные Аарум-Ульвасом, Бердюгиной и Туомином [8], прямо показали наличие на звезде как холодных пятен, так и горячих факелов. С другой стороны, Мессина и др. [9] на основе анализа показателей цвета активных звезд LQ Нуа и DX Leo говорили о сложной структуре запятненных областей, отличных от структуры фотосфера - тень.

В настоящей работе мы рассматриваем трехкомпонентную модель запятненности UX Aгi, состоящую из спокойной фотосферы, холодных пятен и горячих факелов.

2. *История наблюдений.* UX Aгi = HD 21242 - одна из наиболее активных классических RS CVn переменных. Это яркая двойная SB2 система, состоящая из двух компонент K0IV и G5V. Яркая компонента показывает сильную хромосферную эмиссию в линиях НК CaII (открыта еще в 1939г. Хоггом [10]) и переменную эмиссию в линии H α , коррелирующую с фазой вращения звезды [11,12]. UX Aгi показала сильную активность в ультрафиолете, рентгене и радиодиапазоне. Это достаточно тесная система, показывающая признаки перетекания вещества и общей оболочки [13-15]. Фотометрические наблюдения звезды были начаты в 70-е годы Холлом и др. [16], длительные ряды наблюдений получили

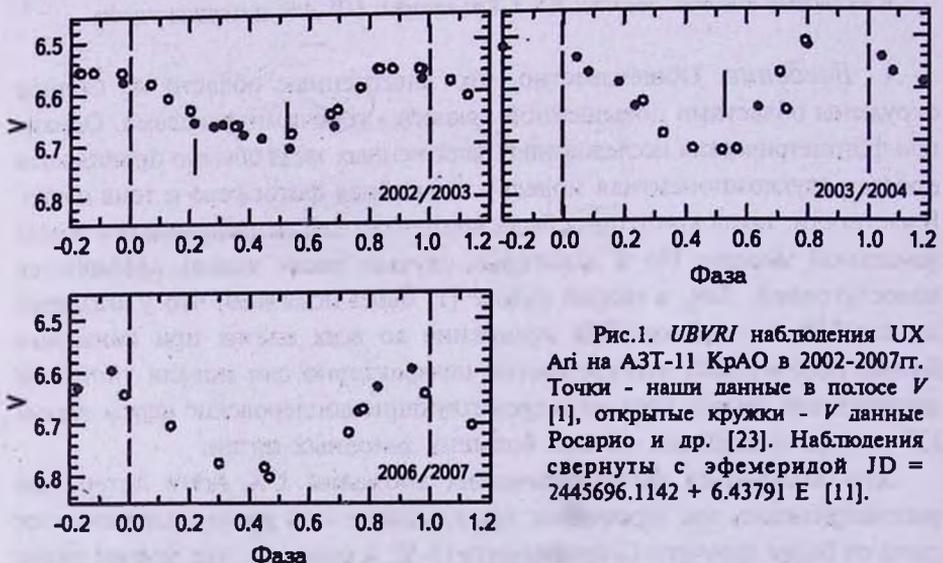


Рис.1. *UBVRI* наблюдения UX Aгi на АЗТ-11 КраО в 2002-2007гг. Точки - наши данные в полосе V [1], открытые кружки - V данные Росарио и др. [23]. Наблюдения свернуты с эфемеридой JD = 2445696.1142 + 6.43791 E [11].

Равендран и Мохин [5], Аарум Ульвас и Генри [17], Родоно и Кутиспото [6]. Фогт и Хатчес [2] впервые получили доплеровские карты яркого компонента системы. Наши наблюдения были получены на 1.25-м телескопе АЗТ-11 КраО в 2002-2004 и 2006-2007гг. (рис.1). Наблюдения показали, что в отличие от других систем типа RS CVn, пятна на UX Aгi распола-

гаются прежде всего в полушарии, противоположном вторичному компоненту [2,5]. Отмечается корреляция между запятненностью звезды и ее радиоизлучением, вызванным вспышками [18].

Сводная кривая блеска переменной построена по данным [1,5,6,16,17]. Максимальный блеск звезды $V_{\text{abs}} = 6^{\text{m}}.344$ достигался в 1998г. [17]. Наибольшая амплитуда вращательной модуляции блеска системы составляла $\Delta V = 0^{\text{m}}.30$, при колебаниях среднего блеска звезды от эпохи к эпохе $\Delta \langle V \rangle = 0^{\text{m}}.21$.

На рис.2 приведены двуцветные диаграммы блеска звезды. Мы видим, что изменения блеска в полосах *UBRI* линейно зависят от изменений блеска в полосе *V*. Эта картина соответствует источнику переменности с постоянной температурой (например, пятнам). Но, в отличие от других запятненных звезд, для UX Aг1 мы наблюдаем поглубение показателей цвета звезды с уменьшением блеска. Полученные коэффициенты линейной регрессии нехарактерны для запятненных звезд: $dU/dV^{\circ} = 0.56 \pm 0.05$, $dB/dV^{\circ} = 0.84 \pm 0.02$, $dR/dV^{\circ} = 1.05 \pm 0.05$, $dI/dV^{\circ} = 1.06 \pm 0.03$. Ниже мы рассмотрим, насколько такие цвета возможно объяснить с помощью трехком-

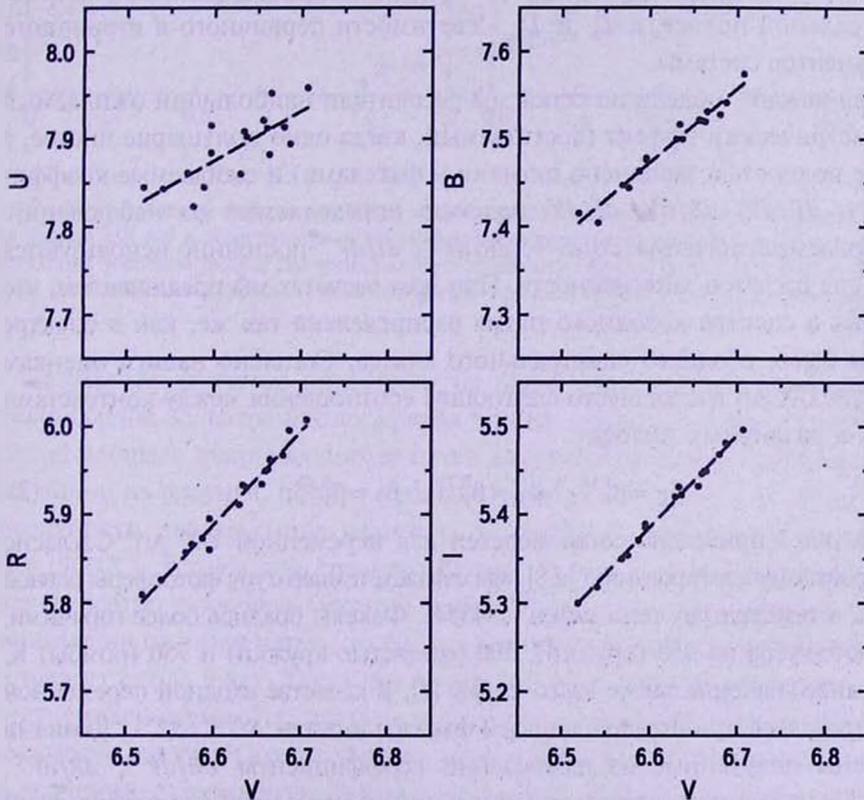


Рис.2. Двуцветные *UBVRI* диаграммы UX Aг1 по наблюдениям в КрАО. Значения наблюдаемых углов наклона составляет $dU/dV = 0.56 \pm 0.05$, $dB/dV = 0.84 \pm 0.02$, $dR/dV = 1.05 \pm 0.05$, $dI/dV = 1.06 \pm 0.03$.

понентной модели. Абсолютная звездная величина и показатели цвета системы в наиболее ярком состоянии составляют $M_V = 2^m.85$, $U - B = 0^m.47$, $B - V = 0^m.91$, $V - R = 0^m.72$, $V - I = 1^m.23$. Это хорошо соответствует спектральному классу K0IV. В дальнейшем мы будем принимать их за характеристики системы UX Ag1 в незапятненном состоянии. Разность блеска между компонентами составляет, согласно [18], $\Delta m_V^{12} = 3^m.09$, что согласуется и с характерными значениями блеска для данных спектральных классов.

3. *Расчеты.* Мы рассмотрели сетку простых трехкомпонентных моделей и рассчитали ожидаемый фотометрический эффект в полосах *BVRI* для простейшего приближения "без потемнения к краю" (модификация метода Фогта [19]). Полосу *U* мы не учитывали, так как она наиболее сильно подвержена влиянию хромосферной активности. Согласно модели, для каждой полосы мы можем написать уравнение вида

$$\Delta m_\lambda = -2.5 \log \left(1 - \left((1 - \beta_\lambda^{spot}) S^{spot} + (1 - \beta_\lambda^{plage}) S^{plage} \right) L_\lambda^1 / (L_\lambda^1 + L_\lambda^2) \right), \quad (1)$$

где S^{spot} и S^{plage} - эффективные площади пятен и факелов в долях видимой полусферы; β_λ^{spot} и β_λ^{plage} - контраст пятен и факелов в данной спектральной полосе, а L_λ^1 и L_λ^2 - светимости первичного и вторичного компонентов системы.

Для каждой модели из сетки мы рассчитали наибольший ожидаемый фотометрический эффект (достигаемый, когда одно полушарие чистое, а другое полностью заполнено пятнами и факелами) и ожидаемые коэффициенты dB/dV , dR/dV , dI/dV , надежно определяемые из наблюдений. Наблюдаемые значения dB/dV^0 , dR/dV^0 , dI/dV^0 постоянно используются нами для расчетов запятненности. При всех расчетах мы предполагаем, что энергия в спектре холодного пятна распределена так же, как в спектре звезды более позднего спектрального класса. Согласно нашим оценкам [20], для UX Ag1 имеют место следующие соотношения между контрастами пятна в различных полосах:

$$\beta_B = \beta_V^{1.18}, \quad \beta_R = \beta_V^{0.72}, \quad \beta_I = \beta_V^{0.42}. \quad (2)$$

На рис.3 приведена сетка моделей для переменной UX Ag1. Согласно доплеровскому картированию [2,8], мы считаем температуру фотосферы равной 4750 K, а температуру тени пятен - 3455 K. Факелы брались более горячими, чем фотосфера на 250 (кружки), 500 (открытые кружки) и 750 (ромбы) K. Последнее значение также взято из ДК [8]. В качестве входной переменной использовалось отношение площадей факелов и пятен S^{plage}/S^{spot} . Линиями отмечены полученные из наблюдений коэффициенты dB/dV^0 , dR/dV^0 , dI/dV^0 и их допуски, а также максимальный наблюдаемый фотометрический эффект в полосе *V*, составляющий $0^m.506$, и наблюдаемый в эпоху 2004.94.

Из рисунка видно, что все три модели могут удовлетворить наблюдаемому

набору параметров. При факелах, более горячих, чем фотосфера на 750 К, мы получаем $S^{plage}/S^{spot} = 0.3$; при $\Delta T = 500$ К - $S^{plage}/S^{spot} = 0.5 + 0.6$, а при $\Delta T = 250$ К - $S^{plage}/S^{spot} = 1.3$. По-видимому, с учетом ДК стоит отдать предпочтение первому варианту. Таким образом, во всех дальнейших расчетах мы полагаем, что факелы на UX Aг1 горячее фотосферы на 750 К и составляют по площади около 30% пятен.

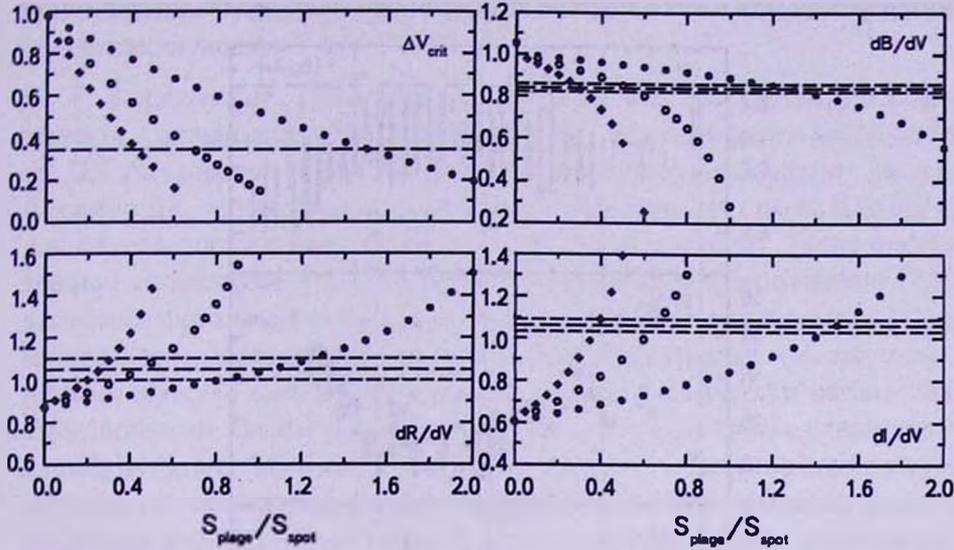


Рис.3. Ожидаемый фотометрический эффект трехкомпонентной модели запятненности для звезды UX Aг1 в зависимости от отношения площадей факелов и пятен. Различными символами показаны разные значения разности температур факела и спокойной фотосферы: 250 К (заполненные кружки), 500 К (открытые кружки) и 750 К (заполненные ромбы).

Результаты расчетов приведены на рис.4. На двух верхних панелях представлены долговременная кривая блеска звезды [1] и временной ход полной площади покрывающих ее пятен для рассмотренного приближения. Как видно из рисунка, полная площадь пятен S изменяется от 10 до 50% поверхности звезды (при разности температур фотосферы и пятен $\Delta T = 1300$ К). Изменения среднего блеска звезды и ее полной площади пятен вероятно цикличны. Средний промежуток времени между локальными минимумами площади пятен (отмечены на рисунке вертикальными линиями) составляет около 9 лет. Такая длительность цикла вполне характерна для запятненных звезд. На следующей панели приведен временной ход светимости звездной хромосферы в линии $H\alpha$. Эти величины получены из значений эквивалентной ширины чистой эмиссии в линии $H\alpha$ и одновременного блеска звезды в полосе R . Этот ход не противоречит утроенному циклу активности, составляющему около 26 лет [17]. На нижней панели рисунка показаны значения фазы главного (точки) и

вторичного (открытые кружки) минимумов блеска. На рисунке мы видим наличие в ряде сезонов двух активных долгот, разнесенных примерно на полпериода. Видно постепенное долговременное уменьшение фаз минимумов блеска со временем, что говорит о неполном совпадении фотометрического периода звезды с орбитальным (фотометрический период несколько короче). В случае точного определения периода этот эффект можно интерпретировать и как следствие дифференциального вращения солнечного

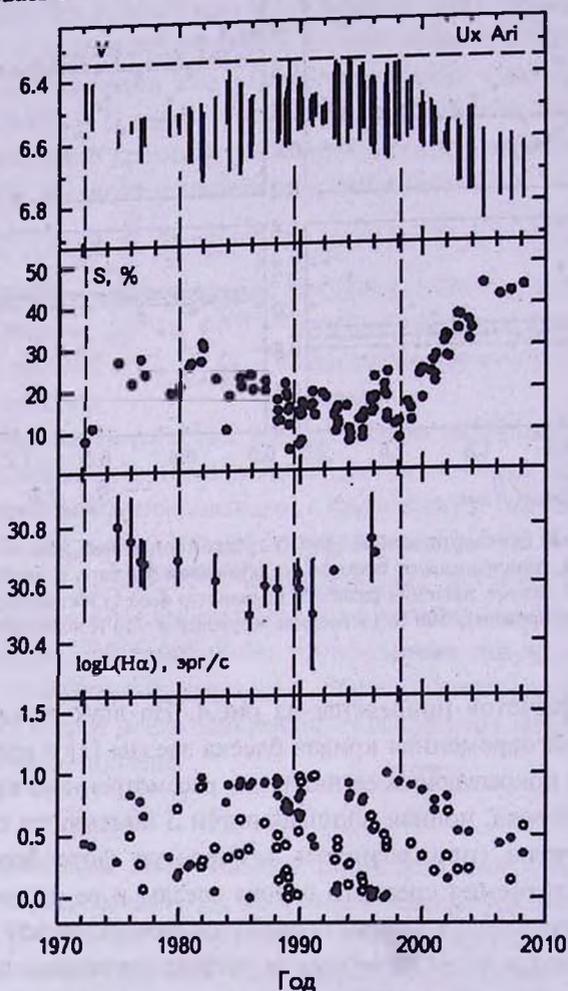


Рис.4. Изменения активности двойной системы UX Ari. Верхняя панель - кривая блеска звезды в полосе V. Вертикальные линии соответствуют сезонным изменениям блеска *peak-to-peak*. Горизонтальная штриховая линия показывает максимальный наблюдаемый уровень блеска звезды $V_{\text{max}} = 6^{\text{m}}.344$. Вторая панель - временной ход эффективной площади запятненных областей, выраженной в процентах полной поверхности звезды. Третья панель - временной ход светимости звездной хромосферы в линии H α . Нижняя панель - временной ход фаз активных долгот переменной. Заполненный кружок соответствует минимуму площади запятненных областей. Вертикальные штриховые линии отмечают

типа - экваториальные области вращаются синхронно с орбитальным движением вторичного компонента, а находящиеся на более высоких широтах пятна попадают в зоны более медленного вращения. Из-за отсутствия в рассмотренной модели метода оценки широт пятен более конкретных выводов о характере и величине дифференциального вращения мы сделать не можем. В эпохи 1991 и 1996гг. наблюдается переключение двух активных долгот, которое, в отличие от других систем, не показывает явной цикличности.

4. *Заключение.* Таким образом, мы показали, что гипотеза о комплексном - холодные пятна и горячие факелы - строении активных областей на UX Ag1 хорошо воспроизводит фотометрическое поведение звезды. Согласно ДК, пятна холоднее спокойной фотосферы на 1300 К, в то время как факелы горячее фотосферы на 750 К (наши расчеты). Такие оценки хорошо согласуются с результатами доплеровского картирования [2,8], расчетами фотометрического поведения по иерархической модели [18] и наблюдением молекулярных полос OH [21]. Эффективная площадь запятанных областей доходит до половины полной поверхности звезды. При этом, согласно нашим оценкам, факелы составляют около одной трети площади пятен. Эта модель плохо согласуется с картиной солнечной активности, где площадь ярких областей превышает площадь пятен в несколько раз [22]. Но в данном случае мы имеем дело с активностью звезды, близкой к насыщению, когда практически вся звезда (до 70% поверхности) предполагается покрытой активными областями (холодные пятна и горячие факелы).

О широтном распределении пятен никаких выводов мы сделать не можем. Временной ход блеска звезды и эффективной площади пятен вероятно цикличесен с характерным временем 8-9 лет. Тройной цикл активности (около 26 лет) не противоречит временному ходу хромосферной эмиссии звезды и хорошо согласуется с ранее отмеченным 25-летним циклом [17]. С другой стороны, данные [23] не подтверждают какой-либо цикличности в изменении площади пятен. Переключения активных долгот также не показывают явной цикличности.

Автор благодарен д.ф.-м.н. Р.Е.Гершбергу (НИИ КрАО) и участникам семинара ЛФЗГ КрАО за конструктивные замечания.

НИИ, Крымская астрофизическая обсерватория, Крым,
Украина, e-mail: ilya-alekseev@mail.ru

THREE-COMPONENT MODEL OF SPOTTEDNESS IN CLASSICAL RS CVN TYPE SYSTEM UX Ari

I.YU.ALEKSEEV

It is shown that the hypothesis of the three-component photospheric structure on UX Ari well reproduces the photometric behaviour of stars. According to the modelling this structure consists of the quiet photosphere, the dark spots which are cooler on 1300 K than the photosphere, and bright faculae which are hotter on 750 K. Such estimates are in good agreement with the results of Doppler imaging, photometric activity and observation of OH molecular bands. Effective area of starspots comes to half of the total stellar surface. According to our estimates, the plage area is about 30 % of the spotarea. Long-term variations of the stellar brightness and spotarea probably is cyclical with a characteristic time of 8-9 years. On the other hand switches of active longitudes do not show obvious cyclicity.

Key words: *stars: RS CVn: stars: UX Ari: spottedness*

ЛИТЕРАТУРА

1. И.Ю.Алексеев, А.В.Кожевникова, *Астрофизика*, 47, 519, 2004.
2. S.S.Vogt, A.P.Harzes, *The Sun and Cool Stars: Activity, Magnetism, Dynamos*, eds. I.Tuominen, D.Moss, G.Rüdiger, Springer-Verlag, 297, 1991.
3. S.W.Wacker, E.F.Guinan, G.P.McCook et al., *Inform. Bull. Var. Stars*, 2920, 1986.
4. S.Mohin, A.V.Raveendran, *J. Astrophys. Astron.*, 10, 35, 1989.
5. A.V.Raveendran, S.Mohin, *Astron. Astrophys.*, 301, 708, 1995.
6. M.Rodono, G.Cutispoto, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 95, 55, 1992.
7. V.Aarum-Ulvas, O.Engvold, *Astron. Astrophys.*, 399, L.11, 2003.
8. V.Aarum-Ulvas, S.V.Berdugina, I.Tuominen, *Astrophysics with the NOT*, eds. H.Karttunen, V.Pirola, University of Turku, 222, 1999.
9. S.Messina, G.Cutispoto, E.F.Guinan et al., *Astron. Astrophys.*, 447, 293, 2006.
10. F.S.Hogg, *Publ. David Dunlap Observ.*, 1, 81, 1939.
11. R.C.Carlos, D.M.Popper, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 83, 504, 1971.
12. B.W.Bopp, J.C.Talcott, *Astron. J.*, 83, 1517, 1978.
13. C.G.Phombs, J.D.Fix, *Astrophys. J.*, 216, 503, 1977.
14. F.Scaltriti, V.Pirola, G.V.Coyne et al., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 102, 343, 1993.
15. R.L.Mutel, J.F.Lestrade, R.A.Preston, R.B.Phillips, *Astrophys. J.*, 289, 262, 1985.

16. *D.S.Hall, R.E.Monte, H.L.Atkins*, Acta Astron., **25**, 125, 1975.
17. *V.Aarum-Ulvas, G.W.Henry*, Astron. Astrophys., **402**, 1033, 2003.
18. *N.M.Elias, A.Quirrenbach, A.Witzei et al.*, Astrophys. J., **439**, 983, 1995.
19. *S.S.Vogt*, Astrophys. J., **250**, 327, 1981.
20. *И.Ю.Алексеев*, Запятненные звезды малых масс, Одесса: АстроПринт, 2001.
21. *D.O'Neal, J.E.Neff, S.H.Saar, J.K.Mines*, Astron. J., **122**, 1954, 2001.
22. *В.Н.Обрядко*, Солнечные пятна и комплексы активности, М., Наука, 1985.
23. *M.J.Rosario, A.V.Raveendran, M.V.Mekkadon*, Astron. Astrophys., **474**, L41, 2007.

