

УДК 524.338.3

## ИК-ФОТОМЕТРИЯ СИМБИОТИЧЕСКОЙ ЗВЕЗДЫ ВF Cyg: ОТКРЫТИЕ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ БЛЕСКА КРАСНОГО ГИГАНТА

© 2005 г. **Б. Ф. Юдин**, **В. И. Шенаврин**,  
**Е. А. Колотилов**, **А. А. Татарникова**, **А. М. Татарников**

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 20.06.2004 г.; принята в печать

Приводятся результаты фотометрических наблюдений классической симбиотической звезды ВF Cyg в ИК-диапазоне, выполненных в 1978–2003 гг. Амплитуда переменности блеска в полосах  $J$ ,  $K$  составила  $\sim 0.2^m$ . В изменениях блеска холодного компонента уверенно выделяется периодическая составляющая с периодом, равным половине орбитального периода, и амплитудой в полосе  $J$ , равной  $\sim 0.15^m$ . Она связывается с эллипсоидальной формой красного гиганта, заполняющего, как показали модельные расчеты, свою полость Роша. Только при этом условии удастся воспроизвести столь заметную амплитуду эллипсоидальной переменности блеска. При заполнении красным гигантом 90% своей полости Роша расчетное значение амплитуды будет в 2 раза меньше наблюдаемой величины. В то же время оказалось невозможным сделать достаточно уверенный выбор таких параметров модели, как отношение масс компонентов  $q = M_{\text{giant}}/M_{\text{hot}}$  и угла наклона орбиты  $i$  в пределах их значений, равных  $q = 2-4$ ,  $i = 70^\circ-90^\circ$ . Показано, что учет вклада горячего источника излучения (горячий компонент + ионизованная оболочка), изменяющегося с периодом, равным орбитальному периоду, заметным образом влияет на оценки параметров эллипсоидальной переменности блеска красного гиганта и, следовательно, им нельзя пренебрегать. Анализ отклонений наблюдаемой кривой блеска от расчетной кривой показал, что они нерегулярны и среднеквадратичное отклонение индивидуальной оценки  $O-C$  составляет  $\sigma(O-C) \approx 0.04^m$ .

### 1. ВВЕДЕНИЕ

ВF Cyg по характеру своей вспышечной активности относится к классическим симбиотическим звездам, прототипом которых является Z And. Нарастание блеска при вспышках происходит в течение нескольких месяцев, а его падение — в течение нескольких лет. Сильные вспышки повторяются через несколько десятков лет. Амплитуда максимальных вспышек достигает  $3^m$  в полосе  $U$ . У некоторых классических симбиотических звезд, в частности и у ВF Cyg, при максимальных вспышках спектр радикально меняется. Очень сильно ослабляется или совсем исчезает эмиссионный спектр высокого возбуждения, а горячий компонент становится похожим на сверхгигант спектральных классов В–F [1, 2]. Последняя вспышка ВF Cyg (1989–1992 гг.) была подробно проанализирована в работе [3]. В частности, было показано, что во время вспышки светимость горячего компонента возросла незначительно (в  $\sim 2$  раза), тогда как температура понизилась от 60 000 до 7000 К.

По интенсивности полос поглощения TiO холодный компонент ВF Cyg классифицируется как красный гигант спектрального класса М4.5–М5.5

[4, 5]. Что касается класса его светимости (II или III), то пока что он однозначно не установлен. По-видимому, наиболее сильным аргументом в пользу III класса светимости является малая величина  $V_{\text{rot}} \sin i$ , соответствующая радиусу красного гиганта  $R_g = 70 \pm 32 R_\odot$  [6]. В таком случае холодный компонент ВF Cyg будет менее чем на половину заполнять свою полость Роша. В то же время Скопал и др. [7], проанализировав временные характеристики затмения горячего компонента, наблюдавшегося в 1999 г. во время его сильной вспышки, пришли к выводу, что красный гигант заполняет свою полость Роша ( $R_g/A = 0.54 \pm 0.02$ ) и является соответственно ярким гигантом II класса светимости.

Эти две ситуации принципиально различны с точки зрения характера обмена массой между холодным и горячим компонентами симбиотической звезды. В первом случае он будет происходить путем захвата горячим компонентом части звездного ветра красного гиганта, во втором — через аккреционный диск. Соответственно различными будут и моделируемые механизмы вспышек горячего компонента (см. [8] и ссылки там). Поэтому

определение степени заполнения холодным компонентом своей полости Роша является одной из фундаментальных задач в изучении классических симбиотических звезд.

В случае симбиотических звезд кривую лучевых скоростей удается построить только для холодного компонента, измеряя лучевые скорости абсорбционных линий, формирующихся в его атмосфере. Линий же горячего компонента в спектре симбиотической звезды выявить не удастся. Все эмиссионные линии возникают в околозвездной оболочке. Поэтому из наблюдений мы можем оценить только функцию масс для холодного компонента. Чтобы найти массы компонентов необходимо какими-то другими методами определить отношение масс компонентов, а также найти угол наклона орбиты.

Кривая лучевых скоростей холодного компонента BF Cyg приведена в работе [6]. Спектры высокого разрешения были получены в районе длины волны  $\lambda \approx 1.62$  мкм. Параметры орбиты оказались следующими:  $P_{orb} = 757.2 \pm 2.6$  сут,  $e = 0$ ,  $f(m) = 0.0239 \pm 0.0026$ . BF Cyg является затменно-двойной звездной системой. Оценки периода изменений блеска звезды в визуальных лучах составляют 757.3 сут [9] и 756.8 сут [10].

Одним из наиболее убедительных аргументов в пользу гипотезы заполнения холодным компонентом своей полости Роша является факт наличия периодической составляющей в вариациях блеска красного гиганта с периодом, равным половине орбитального периода. Они связываются с эллипсоидальной (грушевидной) формой красного гиганта, деформированного приливными возмущениями со стороны его горячего компаньона. Амплитуда эллипсоидальной переменности блеска будет мерой степени заполнения полости Роша. Очевидно, что искать этот эффект следует в ИК-диапазоне, в котором в спокойном состоянии классической симбиотической звезды доминирует красный гигант.

ИК-мониторинг рекуррентной симбиотической новой T CgV выявил у нее наличие эллипсоидальных вариаций блеска с амплитудой в полосе  $J$ , равной  $\sim 0.2^m$  [11]. Их моделирование в рамках эффекта эллипсоидальности холодного компонента позволило оценить отношение масс компонентов и угол наклона орбиты к лучу зрения [12]. Эллипсоидальные вариации  $I$ -блеска были обнаружены у классической симбиотической звезды CI Cyg [13].

В данной работе приводятся результаты многолетних наблюдений BF Cyg в ИК-диапазоне, в котором до настоящего времени имелось лишь несколько оценок блеска звезды. Главная их цель состояла в том, чтобы выяснить, есть ли в изменениях блеска холодного компонента периодическая составляющая с  $P = P_{orb}/2$ , вызванная деформацией красного гиганта приливными возмущениями его горячего компаньона, и если она имеется, то

какова ее амплитуда. Ее наличие и достаточно большая амплитуда были бы серьезным аргументом в пользу того, что красный гигант заполняет свою полость Роша, а ее отсутствие говорило бы в пользу обратного предположения. Отметим, что мы проводим также систематические фотометрические и спектрофотометрические наблюдения BF Cyg в оптическом диапазоне длин волн, подробный анализ которых планируется провести в последующей работе. В этой же статье они будут использованы лишь в той небольшой степени, которая необходима для изучения красного гиганта.

## 2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕДЕНИЯ BF Cyg

Фотометрические  $JHKLM$ -наблюдения симбиотической звезды BF Cyg проведены на 1.25-м телескопе Крымской станции ГАИШ. В качестве стандарта использовалась звезда BS 7417, ее звездные величины составляют  $J = 1.01^m$ ,  $H = 0.16^m$ ,  $K = 0.16^m$ ,  $L = -0.01^m$ . Ошибки оценок блеска звезды не превышали  $0.03^m$  в спектральных полосах  $J$ ,  $H$ ,  $K$  и  $0.06^m$  в полосе  $L$ . В табл. 1 приведены результаты фотометрических  $JHKL$ -наблюдений, начиная с 1978 г. (результаты  $UBV$ -фотометрии с 1993 г. будут представлены в следующей статье). На рис. 1 приведены кривые блеска в полосах  $U$  и  $J$ .

Во время наших наблюдений произошла сильная вспышка горячего компонента BF Cyg, которая началась в 1989 г. Вспышка была хорошо заметна и в инфракрасной области спектра (рис. 1). Так в полосе  $J$  блеск BF Cyg увеличился на  $\sim 30\%$  по сравнению с ее средним блеском в спокойном состоянии звезды. Это связано с тем, что во время вспышки в  $\sim 2$  раза увеличилась светимость горячего компонента и сильно понизилась его температура, так что по фотометрическим и спектральным признакам он был похож на горячий сверхгигант [3]. Судя по нашим спектрофотометрическим наблюдениям, таким он был и в 1987 г., что отразилось в повышенном блеске BF Cyg в полосе  $J$ .

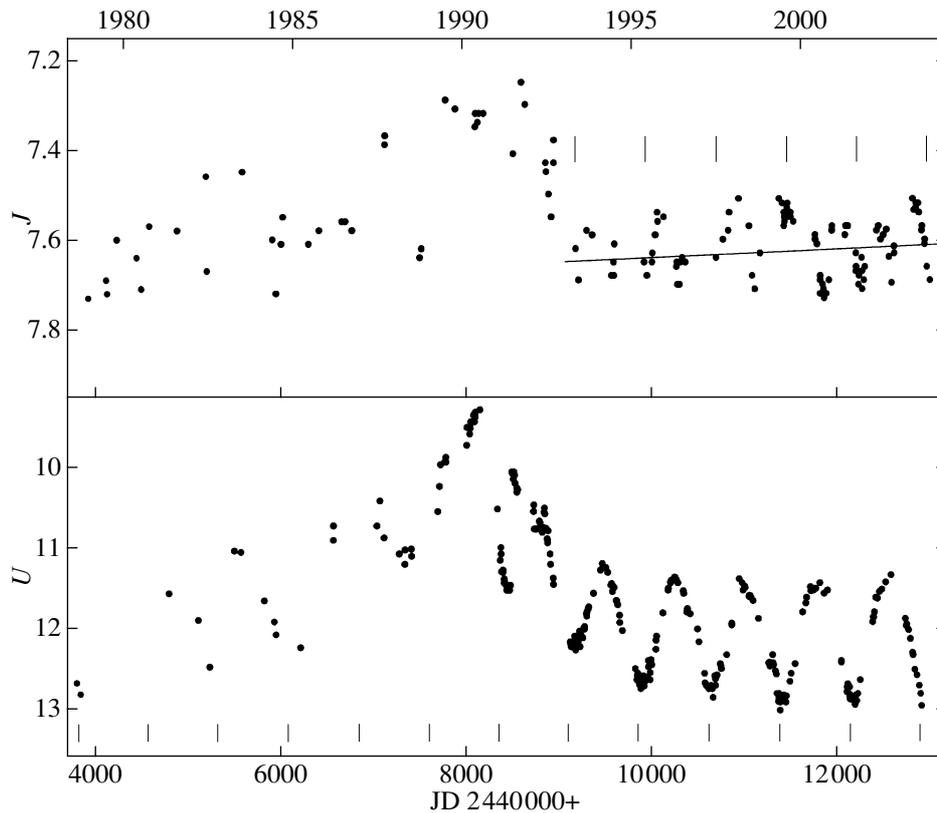
В 1993 г. горячий компонент BF Cyg вернулся к спокойному состоянию, и в это время было решено проводить ИК-наблюдения с максимальной плотностью и минимальной ошибкой, чтобы изучить характер переменности блеска красного гиганта. С этого времени ошибка оценок блеска в полосах  $J$ ,  $K$  не превышала  $0.02^m$ , а для большинства из них она составляла  $\sim 0.01^m$ . Именно этот отрезок кривой блеска, который начинается с JD 2449114 (06.05.1993), будет использован в дальнейшем при изучении переменности блеска красного гиганта. Отметим, что этому способствовало завидное спокойствие горячего компонента вплоть до наших последних наблюдений (см.  $U$ -кривую блеска на рис. 1).

Таблица 1. *JHKLM*-фотометрия VF Cyg

JD 2440000+	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	JD 2440000+	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>
3795			6.38	5.44	8115	7.32		6.05	
3835	7.73		6.41		8437	7.41		6.14	
3836	7.73		6.40		8528	7.25		6.18	
4033	7.69		6.48		8568	7.30	6.34	6.02	
4043	7.72				8790	7.43		6.31	
4151	7.60	6.84			8796	7.45		6.28	
4367	7.64				8790	7.43		6.31	
4414	7.71	6.73	6.40		8796	7.45		6.28	
4507	7.57	6.58			8790	7.43		6.31	
4807	7.58	6.63	6.23		8796	7.45		6.28	
5124	7.46				8823	7.50	6.55	6.18	5.90
5128	7.67	6.41	6.11		8850	7.55		6.20	
5133				5.32	8852	7.55		6.20	
5134				5.48	8878	7.43		6.09	5.69
5245			6.38		8879	7.38		6.13	5.73
5518	7.45	6.52	6.16		9114	7.62		6.31	5.95
5837	7.60				9144	7.69		6.34	6.01
5874	7.72	6.42		5.89	9235	7.58		6.25	5.90
5875			6.19	5.83	9294	7.59		6.24	
5876	7.72			5.83	9502	7.68	6.74	6.33	6.03
5879				5.74	9525	7.65		6.36	5.93
5931	7.61	6.57	6.17	5.81	9529	7.68	6.66	6.30	5.97
5943					9534	7.62	6.66	6.32	5.94
5951	7.55	6.54	6.21	5.92	9855	7.71	6.74	6.45	6.06
5961					9883	7.72		6.35	5.96
6224	7.61	6.58	6.24	6.02	9938	7.65		6.29	
6337	7.58	6.56	6.19	5.89	9943	7.63		6.29	
6579					9974	7.59		6.31	
6580					9997	7.54		6.26	
6581	7.56				10002	7.56		6.25	
6616	7.56	6.56	6.25	5.79	10064	7.55		6.21	
6690	7.58			5.89	10199	7.66	6.65	6.25	6.05
7044	7.39	6.48	6.13	5.80	10204	7.65	6.66	6.27	5.98
7046	7.37				10211	7.70	6.65	6.26	
7418	7.64		6.38		10233	7.70	6.65	6.30	5.95
7436	7.62		6.37		10242	7.65		6.28	
7702	7.29	6.40	6.14	5.82	10261	7.64		6.32	
7808	7.31		6.10		10294	7.65		6.32	
8024	7.35		6.15		10623	7.64		6.28	
8027	7.32		6.14		10699	7.60	6.62	6.28	5.99
8053	7.34		6.12		10754	7.58		6.20	
8064	7.32		6.12		10765	7.54	6.56	6.19	5.91

Таблица 1. Окончание

JD 2440000+	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	JD 2440000+	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>
10868	7.51	6.55	6.19	5.85	12031	7.57		6.23	
10978	7.59		6.22		12037	7.56		6.22	
11009	7.68		6.34		12125	7.63		6.28	
11037	7.71		6.32		12126	7.66		6.30	
11095	7.63		6.24		12127	7.66		6.28	
11300	7.51		6.17		12131	7.67		6.30	
11336	7.52		6.18		12132	7.64		6.31	
11351	7.56		6.21		12153	7.69		6.33	
11355	7.54		6.20		12157	7.68		6.34	
11358	7.55		6.18		12158	7.67		6.33	
11359	7.55		6.20		12187	7.64		6.34	
11360	7.55		6.18		12190	7.67		6.34	
11361	7.54		6.19		12192	7.70		6.31	
11365	7.54		6.20		12211	7.69		6.33	
11383	7.54		6.20		12220	7.66		6.32	
11384	7.55		6.19		12348	7.58		6.24	
11385	7.54		6.22		12367	7.57		6.24	
11387	7.55		6.22		12391	7.59		6.24	
11390	7.52		6.17		12420	7.59		6.24	
11393	7.54		6.18		12455	7.58		6.25	
11420	7.54		6.18		12.483	7.64		6.28	
11421	7.55		6.21		12510	7.70		6.28	
11423	7.53		6.20		12537	7.62		6.28	
11453	7.55		6.23		12540	7.63		6.28	
11686	7.59	6.60	6.22	5.97	12740	7.51		6.18	
11687	7.60		6.24		12751	7.53		6.20	
11707	7.60		6.25		12774	7.53		6.19	
11738	7.68		6.32		12778	7.52		6.19	
11740	7.71		6.31		12800	7.50		6.21	
11741	7.67		6.30		12806	7.54		6.20	
11768	7.71		6.35		12809	7.54		6.22	
11770	7.72		6.36		12836	7.58		6.24	
11777	7.70		6.33		12840	7.57		6.25	
11779	7.71		6.33		12843	7.57		6.24	
11780	7.72		6.33		12866	7.61		6.28	
11782	7.73		6.34		12867	7.61		6.28	
11802	7.72		6.34		12869	7.60		6.28	
11834	7.68		6.31		12871	7.60		6.28	
11865	7.58		6.23		12889			6.31	
11867	7.57		6.21		12890	7.66		6.31	
12007	7.58		6.23		12925	7.69		6.33	
12012	7.56		6.23						



**Рис. 1.** Кривые блеска симбиотической звезды BF Cyg в полосах  $U$  и  $J$ . Сплошной линией показана линейная аппроксимация кривой блеска в полосе  $J$ . Вертикальными черточками отмечены даты главных минимумов блеска звезды, вычисленные из выражения (1).

Вертикальными линиями на рис. 1 отмечены даты минимумов  $U$ -блеска (красный гигант затмевает горячий компонент и часть околозвездной оболочки), рассчитанных согласно выражению

$$\text{Min } U = 2449\,135 + 758.0^d E. \quad (1)$$

Эфемериды были вычислены путем периодограммного анализа  $U$ -кривой блеска BF Cyg, рассматриваемой с 1993 г.

Амплитуда изменений  $J$ -блеска составляет  $\sim 0.2^m$ , т.е. заметно превышает ошибки наблюдений. Таким образом, холодный компонент BF Cyg является переменной звездой, что, в принципе, не удивительно, если принять во внимание достаточно поздний ( $\sim M5$ ) спектральный класс красного гиганта. При аппроксимации  $J$ -кривой блеска линейной функцией (прямая линия на рис. 1) оказывается, что средний уровень блеска красного гиганта в полосе  $J$  за время наших наблюдений поднялся на  $\sim 0.04^m$ . На столько же поднялся и средний уровень  $K$ -блеска, так что среднее значение показателя цвета  $J-K$  оставалось неизменным и равным  $\langle J-K \rangle \approx 1.35^m$ .

При  $E(B-V) = 0.4$  [10] по показателю цвета  $\langle J-K \rangle_0$  красный гигант может быть класси-

фицирован как  $\sim M4$ , если его сравнивать с показателями цвета красных гигантов местной группы [14]. Такому же спектральному классу соответствует и среднее значение показателя цвета  $\langle J-K \rangle_0$ . Если показатель цвета  $\langle J-K \rangle_0$  сравнивать с показателями цвета красных гигантов балджа [15], то красный гигант BF Cyg классифицируется как  $\sim M6$ . Напомним, что по интенсивности полос TiO он классифицируется как  $\sim M5$  [4, 5]. Как показано в работе [15], различие в показателях цвета ИК-излучения красных гигантов, имеющих один и тот же спектральный класс в МК-классификации (полосы TiO), но принадлежащих к разным типам населения Галактики, связано с их разной металличностью. Она больше у красных гигантов балджа. Однако повышенная металличность у красных гигантов симбиотических звезд, если она имеется, скорее всего, носит отпечаток эволюционной истории этих двойных звездных систем и не связана с типом населения.

На рис. 2 показаны диаграммы  $(J, K)$  и  $(J, J-K)$  с одинаковым масштабом по оси ординат. Линейная функция, аппроксимирующая данные зависимости, изображена сплошной линией. Отметим, что при построении данных диаграмм были исполь-

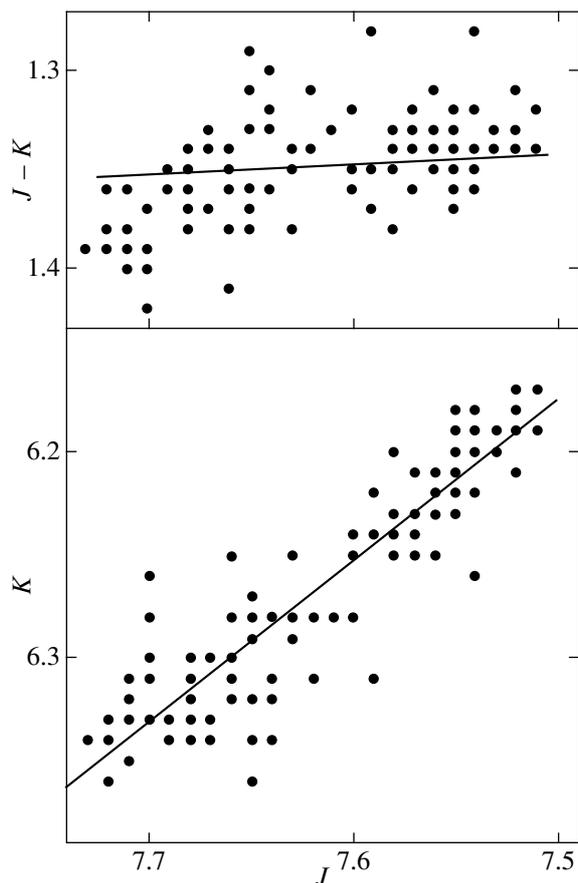


Рис. 2. Диаграммы  $(J, K)$  и  $(J, J-K)$ . Сплошными линиями показана линейная аппроксимация данных зависимостей.

зованы только оценки ИК-блеска, полученные с 1993 г. Из рис. 2 видно, что при уменьшении  $J$ -блеска среднее значение показателя цвета  $J-K$  увеличивается. Его прирост составляет  $\sim 0.05^m$  и соответствует изменению оценки спектрального типа красного гиганта в пределах одного подкласса. Однако разброс точек относительно аппроксимационной прямой не меньше этого прироста. Кроме того, он не меньше соответствующего разброса точек на диаграмме  $(J, K)$ , хотя изменения блеска в этих спектральных полосах в достаточной степени коррелированы. Коэффициент корреляции между  $J$ - и  $K$ -блеском красного гиганта равен  $\sim 0.87$ . В то же время коэффициент корреляции между  $J$ -блеском и показателем цвета  $J-K$  составляет  $\sim 0.45$ , а между  $K$ -блеском и показателем цвета  $J-K$  он близок к нулю, так что диаграмма  $(K, J-K)$  представляет собой облако точек.

### 3. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ БЛЕСКА КРАСНОГО ГИГАНТА

Будем рассматривать кривые блеска ВФ Суг в полосах  $J, K$ , начиная с 1993 г. (JD = 2449 114).

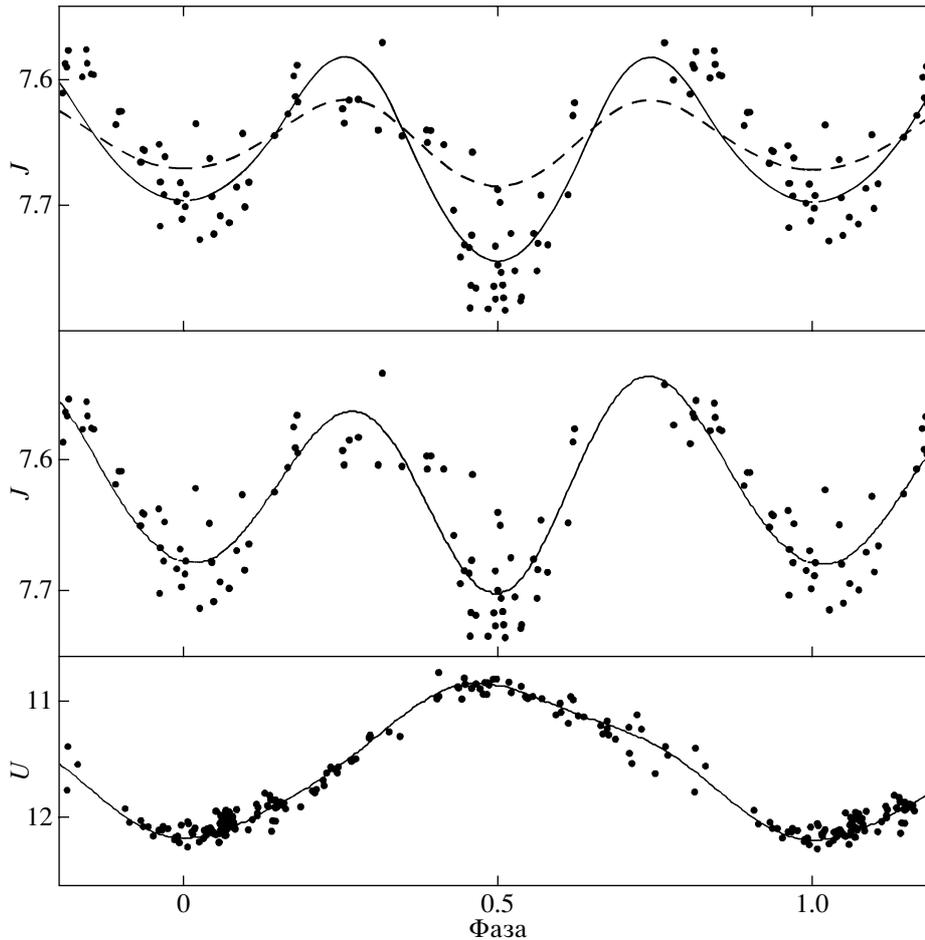
В это время горячий компонент вернулся к спокойному состоянию, и в ИК-диапазоне доминировало излучение красного гиганта. Из рис. 1 видно, что во время минимумов  $U$ -блеска на кривой блеска в полосе  $J$  также наблюдаются минимумы. Исключением является минимум 1999 г. (JD = 24 411 384). В это время на кривой блеска в полосе  $J$ , также как и в полосе  $K$ , наблюдался максимум, вместо минимума, наблюдавшегося в полосе  $U$ .

Возможно, что “запланированный” минимум блеска холодного компонента не состоялся по причине заметной не регулярной переменности блеска красного гиганта, которая характерна для звезд столь позднего спектрального класса. Известно несколько случаев неперiodических изменений ИК-блеска симбиотических звезд, причем блеск менялся как в большую, так и в меньшую сторону от предполагаемого значения (см. [16] и ссылки там). Поэтому точки, соответствующие “пропущенному” минимуму 1999 г., в дальнейшем, при исследовании периодичности будут исключены из рассмотрения, хотя их включение несколько изменит только глубину минимума на свертке кривой блеска, но не отменит вывод о наличии периодичности в изменении блеска красного гиганта ВФ Суг.

Поиск периода колебаний блеска проводился с помощью программы Ю.К. Колпакова (<http://infra.sai.msu.ru/prog/kolpakov>). Метод нахождения периодичности заключается в аппроксимации заданного временного ряда сложным многочленом (далее — аппроксимационная кривая), полиномиальная часть которого (полином третьей степени) восстанавливает кубический тренд постоянной составляющей сигнала, а также разложением в ряд Фурье вплоть до третьей гармоники. Коэффициенты аппроксимирующего многочлена находятся методом наименьших квадратов.

Периодограммный анализ показал наличие колебаний в  $JK$ -блеске с периодами  $P_1 = 767 \pm 15$  сут ( $\approx P_{orb}$ ) и  $P_2 = 381 \pm 5$  сут ( $\approx 1/2P_{orb}$ ). Отличие  $P_1$  от  $P_{orb} = 757.2 \pm 2.6$  сут и от  $P(U) \approx 758.0 \pm 0.4$  сут находится в пределах ошибок определения периода  $P_1$ . Сравнительно большая величина ошибки оценки  $P_1$  связана с заметной нерегулярной переменностью блеска красного гиганта. В частности, по нашему мнению, из-за нее не состоялся “запланированный” минимум ИК-блеска в 1999 г. Отметим, что включение точек 1999 г. при периодограммном анализе блеска красного гиганта, изменит оценки периодов  $P_1$  и  $P_2$  менее чем на 1%, и соответственно эти изменения будут меньше ошибок оценок периодов.

На рис. 3 показаны свертки кривой блеска ВФ Суг в полосах  $U, J$  с периодом 758 сут, а



**Рис. 3.** Свертка кривой блеска BF Cyg в полосах  $U$  и  $J$  в соответствии с выражением (1). На средней панели сплошной линией показана аппроксимационная кривая свертки. На верхней панели наблюдаемые данные исправлены за излучение горячего источника. Сплошной и штриховой линиями на верхней панели показаны расчетные кривые блеска в моделях с параметрами  $q = 3, i = 80^\circ, \mu = 1$  и  $q = 3, i = 80^\circ, \mu = 0.9$ , соответственно. Подробнее см. текст.

также соответствующие аппроксимационные кривые. Сверка  $J$ -кривой блеска с периодом 762 сут ( $2P_2$ ) совершенно не изменит ее вида, также как и параметров аппроксимационной кривой. Начальная эпоха более мелкого минимума  $J$ -блеска (фаза  $\varphi = 0$  на рис. 3) совпала с начальной эпохой минимума  $U$ -блеска (JD 2449135). В дальнейшем этот минимум  $J$ -кривой блеска будем именовать главным минимумом. В это время красный гигант будет находиться вблизи нижнего соединения, экранируя горячий компонент и часть околозвездной оболочки. В соответствии с кривой лучевых скоростей красного гиганта моменты нижнего соединения определяются из выражения

$$T_{\text{conj}} = \text{JD } 2449124 + 757.2 \text{ сут} [6]. \quad (2)$$

Так как мы рассматриваем отрезок времени, когда в ИК-диапазоне доминировало излучение красного гиганта, то главный минимум, глубина которого составляет  $\sim 0.13^m$ , не может быть связан с затме-

нием части горячего источника излучения (горячий компонент + околозвездная оболочка).

Вторичный минимум  $J$ -блеска (красный гигант расположен за горячим компонентом, верхнее соединение) наблюдается при фазе  $\varphi \approx 0.48$ , и он на  $\Delta_{\text{min}} \approx 0.02^m$  более глубокий, чем главный минимум. При отношении радиусов горячего и холодного компонентов, составляющим  $R_{\text{hot}}/R_{\text{giant}} \approx 0.0035$  [10], вторичный минимум, глубина которого составляет  $\sim 0.15^m$ , не может быть вызван затмением части красного гиганта горячим субкарликом. Таким образом, в изменениях ИК-блеска холодного компонента BF Cyg есть периодическая составляющая с периодом, равным половине орбитального периода, которая не связана с эффектом частичного затмения горячего источника излучения или красного гиганта.

В настоящее время подобная переменность блеска холодного компонента (далее эллипсоидальная переменность блеска) связывается с

эллипсоидальной формой красного гиганта (или звезды главной последовательности у катаклизмических переменных), которую он приобретает при заполнении своей полости Роша. Сразу же отметим, что различие в глубине минимумов характерно для эллипсоидальной переменности блеска красного гиганта [12]. Поскольку других вариантов, объясняющих периодичность такого вида в блеске холодного компонента двойной звездной системы, не существует, то в дальнейшем ее анализ будет проведен в рамках модели эффекта эллипсоидальности.

Максимумы  $J$ -блеска наблюдаются при фазах  $\varphi \approx 0.25$  и  $0.73$ , и второй максимум оказывается на  $\sim 0.02^m$  более ярким. В модели эллипсоидальной переменности блеска красного гиганта их яркость должна быть одинаковой. В дальнейшем при сравнении модельной кривой блеска красного гиганта с аппроксимационной или наблюдаемой кривой мы будем использовать среднюю яркость холодного компонента в обоих максимумах его блеска. По аппроксимационной кривой средняя яркость в максимумах превышает яркость во вторичном минимуме на  $A \approx 0.15^m$ . В полосе  $K$  амплитуда переменности блеска  $A \approx 0.13^m$ . Столь значительная амплитуда эллипсоидальной переменности ИК-блеска говорит о том, что красный гигант должен быть близок к заполнению своей полости Роша.

Если же сравнить среднюю яркость гиганта в пределах фаз  $\varphi = 0.2-0.3$  и  $\varphi = 0.7-0.8$  (максимум блеска) с его средней яркостью при  $\varphi = 0.45-0.55$  (вторичный минимум), то разница составит  $A' \approx 0.13^m$ . Такой же она будет, если аналогичное усреднение проводить по аппроксимационной кривой, вычисленной на множестве фаз, соответствующих датам проведенных наблюдений. Среднеквадратичное отклонение индивидуальной оценки отклонения аппроксимационной кривой от наблюдаемой кривой составляет  $\sigma(O-C) \approx 0.04^m$ . Анализ функции  $(O-C)$  показал, что отклонения имеют нерегулярный (случайный) характер, хотя не исключено, что этот вывод может измениться при заметном увеличении количества оценок блеска.

#### 4. МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Модельная кривая блеска красного гиганта, деформированного приливными возмущениями горячего компонента, была рассчитана в рамках классической модели эффекта эллипсоидальности [17], которая базируется на следующих предположениях. Гравитационный потенциал обоих компонентов описывается гравитационным потенциалом двух точечных масс. Осевое вращение красного гиганта синхронизировано с орбитальным обращением. О выполнении этого условия в симбиотических

двойных типа ВФ Суг см. работу [18] и ссылки там. Орбита является круговой. Это следует из [6].

При расчетах предполагалось, что эффективная температура красного гиганта  $T_{eff} = 3000$  К (что соответствует спектральному классу М5 [14]), а каждый элемент его поверхности излучает как чернотельный источник с температурой, контролируемой законом гравитационного потемнения. Как показано в работе [12], полоса  $J$  является наиболее подходящей из  $JHK$ -полос, если заменять реальное распределение энергии в спектре красного гиганта чернотельным источником излучения. Показатель экспоненты в законе гравитационного потемнения принимался равным  $\beta = 0.08$  (закон Люси для звезд с конвективной оболочкой). Коэффициенты потемнения к краю диска были взяты из работы [19].

К входным параметрам модели относятся параметр  $\mu$ , характеризующий степень заполнения полости Роша (в нашем случае  $\mu$  — это отношение полярного радиуса звезды к полярному радиусу полости Роша;  $\mu = 1$  при ее заполнении), а также отношение масс компонентов  $q = M_{giant}/M_{hot}$  и угол наклона орбиты  $i$ . Параметр  $q$  менялся в пределах  $q = 2-6$  (см. [6] и ссылки там).

Амплитуда переменности блеска в полосе  $U$ , равная  $\sim 1.4^m$  (рис. 1), свидетельствует о том, что красный гигант затмевает не только часть околозвездной оболочки горячего компонента, но и сам горячий компонент (в случае сферически-симметричной околозвездной оболочки). В противном случае красный гигант затмевал бы менее половины газовой оболочки, и амплитуда переменности блеска в полосе  $U$  не превышала бы  $0.7^m$ . Поэтому параметр  $i$  менялся в пределах  $i = 90^\circ-70^\circ$ . Оптимальной считалась модель, для которой сумма квадратов отклонений между модельной и наблюдаемой кривой блеска получалась минимальной.

В табл. 2 приведены значения разности звездных величин во вторичном и главном минимумах ( $\Delta_{min}$ ), а также амплитуда переменности  $J$ -блеска ( $A$ ) для модели, в которой красный гигант заполняет свою полость Роша ( $\mu = 1$ ). Оценки указанных параметров проводились по экстремумам модельной кривой. Напомним, что наблюдаемые значения этих параметров, вычисленные по экстремумам аппроксимационной кривой, составляют  $\Delta_{min} \approx 0.02^m$  и  $A \approx 0.15^m$ . Из табл. 2 видно, что такого сочетания параметров  $\Delta_{min}$  и  $A$  в модельных расчетах не получается. Расчетный параметр  $\Delta_{min}$  на  $\sim 0.02^m$  превышает его наблюдаемую величину для тех моделей, которые дают нужное значение параметра  $A$ . Если модель выбирать так, чтобы она воспроизводила нужное значение  $\Delta_{min}$  (уменьшая  $q$  и  $\beta$ ), то, из-за синхронности изменений

параметров  $\Delta_{min}$  и  $A$  параметр  $A$  уже не будет соответствовать нужному значению.

Из табл. 2 видно, что зависимость параметров  $\Delta_{min}$  и  $A$  от входных параметров  $i$  и  $q$  довольно слабая (на уровне  $0.01^m$ ). Кроме того, при определенном сочетании параметров  $i$  и  $q$  параметры  $\Delta_{min}$  и  $A$  практически совпадают (см., например, модели на главной диагонали табл. 2). Формально минимум суммы квадратов отклонений между модельной и наблюдаемой кривой блеска достигается при  $(i, q) = (80, 3.3)$ . Сверка этой модельной кривой показана на рис. 3.

В то же время зависимость амплитуды  $A$  от величины параметра  $\mu$  достаточно резкая, чтобы сделать определенное заключение о степени заполнения красным гигантом полости Роша. Действительно, при  $(i, q) = (90, 3.3)$  и  $\mu = 0.9$  расчетная амплитуда  $A \approx 0.07^m$ , т.е. она в два раза меньше ее наблюдаемого значения (рис. 3). Таким образом, можно утверждать, что холодный компонент VF Cyg практически заполняет свою полость Роша, если, конечно, колебания его блеска с периодом, равным половине орбитального периода, связаны с эффектом эллипсоидальности. Однако никакого другого объяснения природы этих колебаний пока что не существует.

Из-за эффекта затмения блеск горячего источника излучения (горячий компонент + ионизованная оболочка) существенно меняется при орбитальном обращении двойной звездной системы VF Cyg (рис. 1 и 3). Он минимален в главном минимуме и максимален во вторичном минимуме ИК-блеска красного гиганта. Соответственно вклад горячего источника излучения в ИК-блеск VF Cyg (горячий источник + красный гигант) будет минимален в главном минимуме и максимален во вторичном минимуме. В таком случае его учет приведет к увеличению разности блеска гиганта в этих минимумах.

Если принять, что температура горячего компонента в спокойном состоянии составляет  $\sim 6 \times 10^4$  К, электронная температура газовой оболочки  $T_e \sim 10^4$  К, а избыток цвета  $E(B - V) \approx 0.4$  [10], то при среднем блеске горячего источника излучения ( $\langle U \rangle \approx 12.3^m$ ), его вклад в полосу  $J$  будет составлять  $\sim 3\%$ . При амплитуде переменности  $U$ -блеска, равной  $1.4^m$  (рис. 2), вклад горячего источника излучения в полосу  $J$  в главном и во вторичном минимуме  $J$ -блеска будет составлять  $\sim 1.3\%$  и  $\sim 4.7\%$ , соответственно. Принимая, что блеск горячего источника излучения меняется гармонически с периодом, равным 758 сут, мы вычли его вклад в полосу  $J$ , получив тем самым “чистый” блеск красного гиганта.

**Таблица 2.** Зависимость параметров модельной кривой блеска  $\Delta_{min}/A$  (разница в звездных величинах между вторичным и главным минимумами/амплитуда вторичного минимума) от входных параметров модели  $q$  и  $i$  ( $q = M_{giant}/M_{hot}$ ,  $i$  — угол наклона орбиты) при заполнении холодным компонентом своей полости Роша.

$i$	$q$		
	4	3.3	2.5
	$\Delta_{min}/A$		
$90^\circ$	0.045/0.141	0.047/0.151	0.051/0.167
$80^\circ$	0.042/0.136	0.044/0.146	0.048/0.162
$70^\circ$	0.035/0.125	0.037/0.134	0.040/0.148

Отметим, что в полосе  $J$  вклад горячего компонента в излучение горячего источника излучения составляет менее 10%, т.е. в ИК-диапазоне главную роль в нем играет ионизованная оболочка. Кроме того, вклад горячего источника излучения в полосу  $K$  будет отличаться от его вклада в полосу  $J$  не более чем на 0.5%. Следовательно, при его учете показатель цвета  $J - K$  не изменится. Соответственно не изменится и спектральная классификация красного гиганта (см. раздел 2).

Свертка “очищенной” кривой блеска красного гиганта с периодом, равным 758 сут, показана на рис. 3 совместно со сверткой расчетной кривой, рассчитанной при  $\mu = 1$ ,  $q = 3.3$ ,  $i = 80^\circ$  (табл. 2). Нормировка расчетной кривой к наблюдаемой кривой осуществлялась, исходя из условия, чтобы среднее значение  $\langle O - C \rangle = 0$ . Среднеквадратичное отклонение индивидуальной оценки  $O - C$  составляет  $\sigma(O - C) \approx 0.04^m$ .

Если сравнить среднюю яркость гиганта в пределах фаз  $\varphi = 0.2 - 0.3$  и  $\varphi = 0.7 - 0.8$  (максимум блеска) с его средней яркостью при  $\varphi = 0.45 - 0.55$  (вторичный минимум), то разница составит  $A' \approx 0.134^m$  (без учета горячего источника излучения  $A' \approx 0.122^m$ ). Если сравнить среднюю яркость гиганта в пределах фаз  $\varphi = -0.05 - 0.05$  (главный минимум) с его средней яркостью при  $\varphi = 0.45 - 0.55$  (вторичный минимум), то разница составит  $\Delta'_{min} \approx 0.045^m$  (без учета горячего источника излучения  $\Delta'_{min} \approx 0.015^m$ ). Если аналогичное усреднение проводить по расчетной кривой ( $\mu = 1$ ,  $q = 3.3$ ,  $i = 80^\circ$ ), вычисленной на множестве фаз, соответствующих датам проведенных наблюдений (рис. 4), то  $A' \approx 0.137^m$  и  $\Delta'_{min} \approx 0.042^m$ .

Сравнение показывает, что модель достаточно хорошо воспроизводит характеристики периодической составляющей кривой блеска красного гиганта, когда при оценках его блеска учитывается

вклад (хотя и незначительный) горячего источника излучения. Тем не менее, отметим еще раз, что однозначный выбор модели, из списка, приведенного в табл. 2, невозможен. Этому мешает значительная нерегулярная переменность ИК-блеска красного гиганта, которая деформирует периодическую составляющую, связанную с эффектом эллипсоидальности, внося заметные ошибки в определение таких ее параметров, как  $A$  и  $\Delta_{min}$ . Мешает однозначному выбору и относительно слабая зависимость параметров модельной кривой блеска  $A/\Delta_{min}$  от таких входных параметров модели, как  $q$  и  $i$ . (табл. 2).

Однако уверенно можно утверждать, что эллипсоидальная переменность блеска с большой амплитудой, а также с различными по глубине минимумами существует. Большая амплитуда, в совокупности с достаточно резкой зависимостью амплитуды модельной кривой блеска от степени заполнения холодным компонентом своей полости Роша (параметр  $\mu$ ), позволяет утверждать, что холодный компонент ВФ Cyg практически заполняет свою полость Роша и относится соответственно к красным гигантам II класса светимости.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, многолетние наблюдения классической симбиотической звезды ВФ Cyg в ИК-диапазоне показали, что в изменениях блеска красного гиганта присутствует периодическая составляющая с периодом, равным половине орбитального периода, и амплитудой в полосе  $J$ , равной  $\sim 0.15^m$ .

Эти колебания блеска связываются с эллипсоидальной формой холодного компонента ВФ Cyg, который, как показали модельные расчеты, должен заполнять свою полость Роша. В таком случае аккреция вещества красного гиганта на горячий компонент происходит через аккреционный диск, который может обеспечить темп аккреции, достаточный с энергетической точки зрения, чтобы воспроизвести наблюдаемые новоподобные вспышки ВФ Cyg.

Обнаруженный эффект не противоречит современным знаниям о ВФ Cyg. То, что холодный компонент системы заполняет полость Роша, обнаружено во время затмения им горячего компонента в 1999 г. [7]. Прямой ответ на вопрос, является ли ВФ Cyg красным гигантом или ярким гигантом II класса светимости, можно было бы получить, если знать расстояние до системы. Однако расстояние до звезды прямыми методами определить невозможно. Так как расстояние до ВФ Cyg превышает 2 кпк и она находится достаточно высоко над галактической плоскостью ( $b \approx 7^\circ$ ), то не работает в данном случае и метод оценки расстояния по величине межзвездного поглощения (по нему

в случае ВФ Cyg можно оценить лишь нижнюю границу расстояния  $\sim 500$  пк [10], что недостаточно для звезды III и тем более II класса светимости). Не дает точного ответа на этот вопрос и спектральная классификация [20].

В настоящее время эллипсоидальные вариации блеска обнаружены у таких классических симбиотических звезд, как CI Cyg [13] и YY Her [21]. В то же время они определенно отсутствуют у таких не эруптивных симбиотических звезд, как V443 Her [22] и RW Hya [23], хотя эти звезды являются своего рода двойниками классических симбиотических звезд, когда последние находятся в спокойном состоянии. Сходны и их орбитальные периоды.

Причины, по которым одни из этих внешне сходных симбиотических звезд вспыхивают, а другие не вспыхивают, пока что однозначно не установлены. На наш взгляд, наиболее вероятно, что причина заключается в различной степени заполнения холодным компонентом своей полости Роша. При достаточном ее заполнении происходит замена малоэффективной аккреции из звездного ветра красного гиганта, которой в значительной мере противодействует собственный звездный ветер горячего компонента, на более эффективную дисковую аккрецию [8]. Однако прямых доказательств заполнения холодными компонентами классических симбиотических звезд своей полости Роша собрано еще не достаточно. Чтобы уверенно определить, есть ли эллипсоидальные вариации в блеске красного гиганта, нужны многолетние систематические наблюдения в ИК-диапазоне.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 02-02-16235, 03-02-06765, 03-02-16662).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. А. Боярчук, Р. Е. Гершберг. *Эруптивные звезды* (М.: Наука, 1970), с. 113.
2. S. J. Kenyon, *The symbiotic stars* (Cambridge Univ. Press, 1986), p. 283.
3. A. Cassatella, T. Fernandez-Castro, R. Gonzales-Riestra, and J. J. Fuensalida, *Astron. and Astrophys.* **258**, 368 (1992).
4. A. P. Ipatov, and B. F. Yudin, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **65**, 51 (1986).
5. Z. X. Zhu, M. Friedjung, G. Zhao, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **140**, 69 (1999).
6. F. C. Fekel, K. H. Hinkle, R. R. Joyce, *et al.*, *Astron. J.* **121**, 2219 (2001).
7. A. Skopal, A. Vittone, L. Errico, *et al.*, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **292**, 703 (1997).
8. А. А. Татарникова, М. Речкуба, Л. М. Бусон, и др., *Астрон. журн.*, **77**, 220 (2000).

9. A. Pucinskas, Bull. Vilnius Astron. Observ. No. 27 (24).
10. J. Mikolajewska, S. J. Kenyon, and M. Mikolajewski, Astron. J. **98**, 1427 (1989).
11. B. Yudin, and U. Munari, Astron. and Astrophys. **270**, 165 (1993).
12. T. Shahbaz, M. Somers, B. Yudin, and T. Naylor, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **288**, 1027 (1997).
13. J. Mikolajewska, Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser. **246**, 167 (2001).
14. T. A. Lee, Astrophys. J. **162**, 217 (1970).
15. D. M. Terndrup, J. A. Frogel, and A. E. Whitford, Astrophys. J. **357**, 453 (1990).
16. U. S. Kamath and N. M. Ashok, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **135**, 199 (1999).
17. S. J. Tjemkes, J. van Paradijs, and E. J. Zuiderwijk, Astron. and Astrophys. **154**, 77 (1986).
18. W. Schmutz, H. Schild, U. Murset, and H. M. Schmid, Astron. and Astrophys. **288**, 819 (1994).
19. A. Claret, Astron. and Astrophys. **363**, 1081 (2000).
20. S. J. Kenyon and T. Fernandez-Castro, Astron. J. **93**, 938 (1987).
21. J. Mikolajewska, E. A. Kolotilov, S. Yu. Shugarov, and B. F. Yudin, Astron. and Astrophys. **392**, 197 (2002).
22. Е. А. Колотилов, У. Мунари, А. А. Попова, Б. Ф. Юдин, Письма в "Астрон. журн." **24**, 39 (1998).
23. J. Mikolajewska, E. A. Kolotilov, V. I. Shenavrin, and B. F. Yudin, Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser. **261**, 645 (2002).

## Название статьи

## Список авторов

Аннотация