

УДК: 524.387

СИСТЕМА ВМ Огі. IV. НОВЫЙ КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ

Э.А.ВИТРИЧЕНКО¹, В.Г.КЛОЧКОВА², В.В.ЦЫМБАЛ³

Поступила 9 сентября 2005

Принята к печати 14 ноября 2005

Методом кросс-корреляции между наблюдаемым и синтетическим спектрами обнаружен еще один спутник ВМ Огі со следующими характеристиками: эффективная температура $T_{\text{эф}} = 4000$ К, радиус $R = 16 R_{\odot}$, масса $M = 1.8 M_{\odot}$, спектральный тип K7 III, абсолютная болометрическая звездная величина $M_v = +4^{\text{m}}.0$, скорость осевого вращения $V_{\text{вип}} = 85$ км/с, относительная светимость вблизи полосы V равна 0.005.

1. *Введение.* Кратная система ВМ Огі (= HD 37021) является членом Трапеции Ориона. Два компонента образуют затменную систему, период которой равен 6.5 сут.

Одна из множества загадок системы ВМ Огі - эпизодические отклонения лучевой скорости, выходящие за пределы ошибок. Впервые этот факт отмечен в [1]. Авторы обнаружили, что два измерения лучевой скорости спутника отклоняются от средней кривой на +20 км/с. При этом точность измерения межзвездных линий ~ 1 км/с. Авторы не смогли объяснить это явление.

В работах [2,3] этот факт был подтвержден, и авторы предположили, что в системе есть еще один спутник, который обращается вокруг центра тяжести тройной системы, если пренебречь еще тремя спутниками, находящимися на значительном удалении от тройной системы.

В статье [4] выполнен анализ невязок лучевой скорости главной звезды и спутника и определены предварительные элементы орбиты затменной системы с учетом обращения этого второго спектроскопического спутника. Назовем его так потому, что у ВМ Огі есть еще три астрометрических спутника [5]. Элементы спектроскопической орбиты нового спутника оказались следующими: $E_p = \text{JD } 2444744$, $P = 1302^{\text{d}}$, $\gamma = 11$ км/с, $e = 0.92$, $K = 20$ км/с, $\omega = 1.6$ рад.

Задачами настоящей работы являются: методом кросс-корреляции между наблюдаемым и синтетическим спектрами обнаружить второй спутник, измерить его лучевую скорость и сравнить ее с лучевой скоростью затменной системы, определенной по приведенным выше элементам. Это позволит оценить массу нового спутника, оценить

эффективную температуру, скорость осевого вращения и относительную светимость.

2. *Кросс-корреляционный анализ спектра.* Для исследования был выбран спектр, полученный одним из авторов (ВК) на 6-м телескопе. Время наблюдений JD 2451246.329 [5]. Для него O-C составляет +34 км/с. Эта величина наибольшая из всех отмеченных величин O-C. Кроме того, этот спектр имеет наилучшее качество по критерию отношения сигнал/шум. Для построения кросс-корреляционных функций был выбран участок спектра 5100-5500 Å, в пределах которого нет сильных линий главной звезды, значительных межзвездных и теллурических линий. В то же время этот участок богат линиями железа обоих спутников. Именно эти линии и формируют кривую кросс-корреляции.

Использовалось предположение, что химический состав спутников близок к солнечному. Аргументом в пользу такого предположения является работа [3], в которой показано, что содержание железа у спутника в затменной системе близко к солнечному. Химический состав второго спутника не изучался.

Предварительный анализ кросс-корреляционных кривых показал, что для второго спутника максимальный коэффициент корреляции получается при сравнении наблюдаемого спектра с синтетическим при температуре 4000 К, что соответствует спектральному классу K7.

На рис.1 показана зависимость коэффициента корреляции R от лучевой скорости. Синтетический спектр был вычислен с параметрами $T_{\text{eff}} = 7000$ К, $\log g = 4.5$, $[M/H] = 0$, $V \sin i = 0$ км/с. Максимум принадлежит спутнику, производящему затмения. Назовем этот спутник В1.

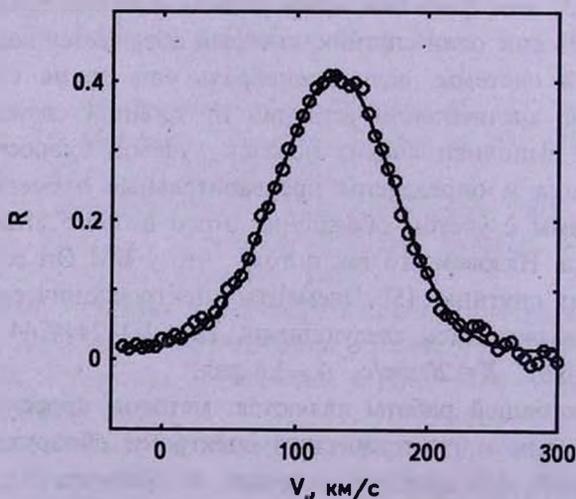


Рис.1. Зависимость коэффициента кросс-корреляции R от лучевой скорости V_r спутника В1. Кружки - наблюдения, сплошная линия - аппроксимация наблюдений формулой Гаусса.

Линии спутника В1 были обнаружены в спектре. Измеренная по ним инструментальная скорость (без учета движения Земли) оказалась равной 132(1) км/с, а измеренная по максимуму коэффициента корреляции равна 130.5(4) км/с. Согласие результатов подтверждает правильность техники расчетов.

На рис.2 показан фрагмент кросс-корреляционной кривой для области, где расположен максимум для второго спектроскопического спутника. Назовем его В2. При построении кривой использовались следующие параметры синтетического спектра: $T_{\text{эф}} = 4000 \text{ K}$, $\log g = 4.5$, $[M/H] = 0$, $V \sin i = 0 \text{ км/с}$. Лучевая скорость оказалась равной -126(3) км/с. Как уже указывалось, в системе ВМ Оп. IV есть еще три спутника [5], следы которых не видны на кросс-корреляционной кривой. Не видна и главная звезда. Причину этого можно искать в различии температур компонентов системы. Возможно также, что два спутника, расположенные к юго-западу от главной звезды на расстоянии $\sim 1''$, не попали в диафрагму спектрографа.

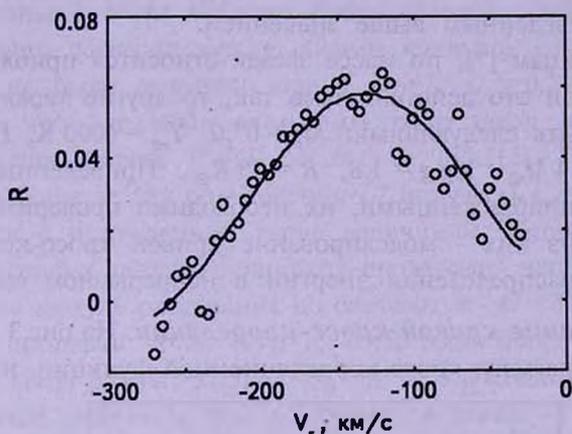


Рис.2. То же, что и на рис.1, но для спутника В2.

Следующая величина, которая определяется по кривой кросс-корреляции, — скорость осевого вращения. Для полной уверенности указанная величина сначала была определена для первого спутника, для которого она известна. Техника этого определения следующая. Наблюдаемый максимум аппроксимируется кривой Гаусса и определяется ее параметр. Затем строится ряд синтетических спектров с разной скоростью вращения. Для каждого спектра определяется параметр формулы Гаусса, после чего строится калибровочная кривая. По этой кривой определяется $V \sin i$ для наблюдаемого спектра. В результате получилось $V \sin i = 56(4) \text{ км/с}$. Эту же величину мы ранее определили по контурам линий и получили $V \sin i = 60(3) \text{ км/с}$ [5]. Совпадение хорошее, что вновь

подтверждает надежность примененной техники. Ранее подобная техника использовалась для массового определения скоростей вращения ранних звезд по спектрам, полученным спутником IUE [6].

Таким же образом была определена скорость осевого вращения и для спутника В2. Оказалось, что $V_{\text{ini}} = 85(4)$ км/с.

3. *Масса звезды В2.* Массы главной звезды и спутника В1 довольно надежно определены: они равны соответственно $6.3(3) M_{\odot}$ и $2.5(1) M_{\odot}$ [5]. Влияние спутника В2 для исследуемого спектра вызывает смещение γ -скорости затменной системы на $+34$ км/с. Исправленная на обращение Земли лучевая скорость спутника равна 152 км/с. Средняя γ -скорость для тройной системы составляет $+15(2)$ км/с. Тогда отношение массы спутника В2 к массе затменной системы равно $34/(152+15) = 0.204$. Масса спутника В2 равна $0.204 (6.3+2.5) = 1.8(2) M_{\odot}$. Ошибка в величине массы оценена по ошибкам в исходных данных.

В работе [4] при некоторых предположениях из анализа функции масс оценена масса спутника В2 $M = 2.2 M_{\odot}$, что удовлетворительно согласуется с приведенным выше значением.

Согласно таблицам [7], по массе звезда относится приблизительно к типу К7 III. Если это действительно так, то другие характеристики звезды должны быть следующими: $M_V = 0^m.0$, $T_{\text{эф}} = 4000$ К, $BC = -1^m.2$, $M_b = -1^m.2$, $M = 2.4 M_{\odot}$, $\log g = 1.8$, $R = 35 R_{\odot}$. Приведенные оценки являются весьма приближенными, их необходимо проверить другими методами. Один из них - моделирование кривой кросс-корреляции, другой - анализ распределения энергии в непрерывном спектре.

4. *Моделирование кривой кросс-корреляции.* На рис.3 сплошной линией показан фрагмент кросс-корреляционной функции, на котором

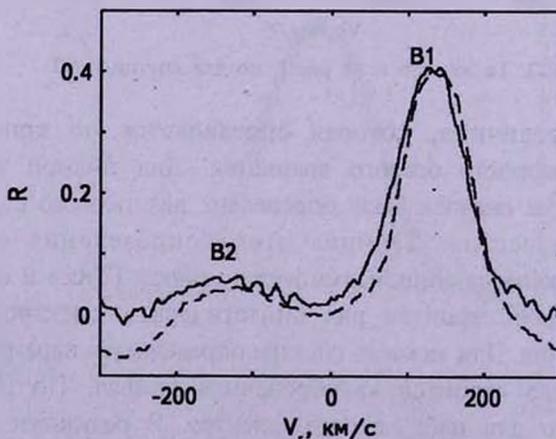


Рис.3. Кривая кросс-корреляции между наблюдаемым и синтетическими спектрами (сплошная линия) и синтетической моделью наблюдаемого спектра и синтетическим спектром (прерывистая линия).

видны максимумы, принадлежащие спутникам В1 и В2. Наблюдаемый спектр был коррелирован с синтетическим спектром, вычисленным для спутника В2.

Для того, чтобы определить относительные светимости L_1 и L_2 спутников, был вычислен синтетический спектр S , имитирующий наблюдаемый спектр, по формуле

$$S = L_1 S_1 + L_2 S_2 + L_3 S_3.$$

В этой формуле L_i - относительные монохроматические светимости главной звезды и спутников, S_i - синтетические спектры главной звезды и спутников, сдвинутые по шкале длин волн на величину, соответствующую лучевой скорости. Введено также расширение линий, связанное со скоростью вращения вокруг оси. По определению относительной светимости $L_i = F_i / \Sigma F_i$, где F_i - монохроматические потоки от каждой звезды.

На рис.3 прерывистой линией показана функция кросс-корреляции между синтетическим спектром S и модельным спектром для спутника В2. Величины L_i были выбраны таким образом, чтобы достичь удовлетворительного согласия между обеими кривыми кросс-корреляции.

Согласие было получено при $L_1 = 0.7$, $L_2 = 0.295$, $L_3 = 0.005$. Это означает, что звездные величины трех звезд вблизи полосы V соответственно равны $7^m.7(1)$, $8^m.6(1)$ и $13^m.1(5)$. По приведенной в работе [3] формуле для определения L_2 получаем $L_2 = 0.305$, что хорошо согласуется с приведенной выше величиной. Небольшое различие в наклонах кривых связано с ошибкой проведения непрерывного спектра.

Примем модуль расстояния до системы $m - M = 8^m.22$ [5] и болометрические поправки $-1^m.8$, $-0^m.1$ и $-0^m.5$, тогда абсолютные визуальные величины звезд равны $-0^m.5$, $+0^m.4$, $+4^m.5$, а абсолютные болометрические звездные величины трех компонентов равны $-2^m.3$, $+0^m.3$ и $+4^m.0$.

По светимости и температуре с помощью закона Стефана-Больцмана, определяется радиус спутника В2, равный $R = 16 R_\odot$. Эта величина в два раза меньше, чем та, которую мы оценили ранее. Расхождение связано с тем, что значения радиуса гиганта К7 лежат в широких пределах в зависимости от его светимости.

5. *Анализ непрерывного спектра.* В работе [8] изучался непрерывный спектр системы ВМ Ori. Авторы пришли к выводу, что излучение состоит из трех компонентов: излучения главной звезды В3 начальной Главной последовательности ($M_v = -0^m.98$), излучения звезды F2 ($M_v = -0^m.3$) и излучения горячей пыли с температурой 1100(300) К. Поглощение до звезды подчиняется нормальному закону и составляет $A_v = 0^m.74(5)$.

В связи с обнаружением еще одного спутника в системе ВМ Ori

приведенные выше результаты должны быть пересмотрены. Для анализа были использованы те же фотометрические наблюдения, которые были приведены в указанной работе, однако при этом была принята четырех-компонентная модель системы: главная звезда, два спутника и пыль.

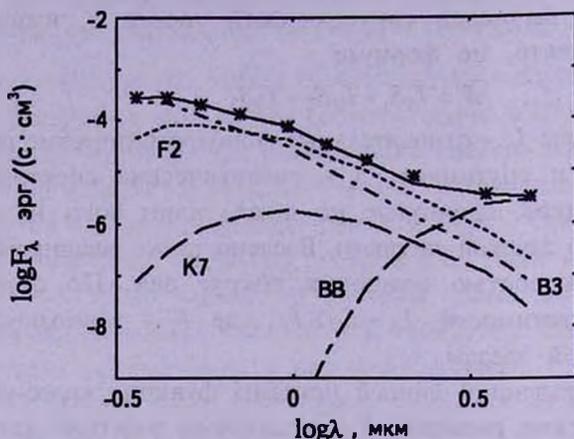


Рис.4. Результаты моделирования непрерывного спектра системы $VM\ Opi$. Звездочки - наблюдаемый спектр, сплошная линия - суммарный синтетический спектр. В распределении энергии звезд B3 (главная звезда), F2 (спутник B1), K7 (спутник B2) и пыли учтено межзвездное поглощение с $A_V = 0^m.7$.

Результаты показаны на рис.4. Они были получены методом проб и ошибок (метод подгонки параметров). Как видно из рисунка, наблюдаемый спектр (звездочки) удовлетворительно согласуется с вычисленным суммарным спектром (сплошная линия). Наибольшее отклонение наблюдается в области полосы K, однако, как отмечалось в работе [8], именно в этой полосе наблюдения ненадежны.

Для системы получены следующие характеристики. Величины V непокрасневших звезд равны: $8^m.0$, $8^m.5$, $13^m.5$. Результат удовлетворительно согласуется с оценкой, полученной методом кросс-корреляции. Черное тело имеет температуру 640 K, его радиус $140 R_{\odot}$. Закон поглощения - нормальный с $A_V = 0^m.7$.

Наиболее интересный результат - значительное снижение температуры пыли по сравнению с тем, который был получен в [8]. Эффект связан с присутствием в системе звезды K7.

В статье [9] приведены данные по спектру для области длин волн 1200-3200 Å. Используются спектры, полученные спутником IUE. Мы попробовали включить эти данные в анализ, но они противоречат наблюдениям, полученным в более длинноволновой области спектра. Причину следует искать в недостаточной точности фотометрической калибровки материалов спутника IUE.

В табл.1 приведен бюджет излучения системы. Как уже отмечалось,

наибольшая невязка О-С наблюдается в полосе К. Из рассмотрения таблицы видно, в каком диапазоне спектра легче всего обнаружить линии каждого из компонентов системы. Звезда В3 является основным источником излучения в полосе U, затмевающий спутник F2 вносит наиболее значительный вклад в полосе H, линии гиганта К7 следует искать в области полос НК, а пыль вносит подавляющий вклад в полосе М.

Таблица 1

БЮДЖЕТ ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ВМ Огі

Полоса	λ , мкм	В3	F2	К7	Пыль	О - С
U	0.36	0.84	0.16	0.00	0.00	0.00
V	0.44	0.76	0.28	0.00	0.00	-0.04
Y	0.55	0.64	0.40	0.00	0.00	-0.05
R	0.71	0.49	0.46	0.01	0.00	0.04
I	0.97	0.42	0.58	0.02	0.00	-0.02
J	1.25	0.34	0.60	0.04	0.00	0.02
H	1.62	0.27	0.63	0.06	0.00	0.03
K	2.20	0.17	0.41	0.06	0.06	0.30
L	3.50	0.08	0.22	0.03	0.67	0.01
M	4.70	0.02	0.06	0.01	0.94	-0.04

6. *Дискуссия.* Достоверность полученных результатов оценим в терминах отношения сигнал/шум (С/Ш). Для спутников В1 и В2 амплитуды максимума коэффициента корреляции равны 0.476 ± 0.004 и 0.078 ± 0.001 соответственно. Тогда отношение С/Ш составит $0.476/4 = 119$ и $0.078/0.001 = 78$. Известно, что результат считается надежным при условии $С/Ш \gg 3$. Видно, что условие выполняется с большим запасом.

Обнаружение нового спутника, расположенного вблизи затменной системы, заставляет ставить вопрос об устойчивости системы. Как известно, тесная тройная система должна разрушаться за счет "испарения" из системы менее массивного компонента. Можно предположить, что мы наблюдаем последний этап этого процесса. Аргументом является то, что эксцентриситет орбиты спутника В2 близок к единице. Альтернативный сценарий - спутник недавно захвачен затменной системой.

В статье Клоуз и др. [10] кратная система θ^1 Огі В названа "хорошим примером мини-скопления, которое может "выбрасывать" в ближайшем будущем звезды наименьшей массы. Этот процесс "выбрасывания" может играть главную роль в образовании маломассивных одиночных звезд поля и коричневых карликов". Весьма вероятно, что обнаруженный спутник находится на последней стадии "выбрасывания".

На рис.5 показаны относительные орбиты двух спутников. Условно предполагается, что плоскости орбит совпадают. Из рисунка видно,

насколько близко расположены звезды в момент прохождения спутником В2 периастра. Этот факт может быть ключом к разгадке природы нестабильности спектра и кривой блеска. Например, на спектре, полученном в JD 2451242.2, около половины линий спутника В1 показывает эмиссионный компонент, смещенный на 40-50 км/с в коротковолновую

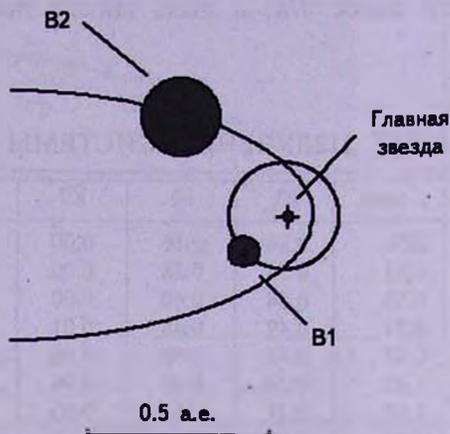


Рис.5. Схема, показывающая орбиты спутников В1 и В2. Главная звезда отмечена крестиком. Относительные размеры звезд и орбит соблюдены.

сторону [3]. Оказывается, что в этот момент фаза спутника В2, отсчитываемая от периастра, составляла 0.99, то есть, согласно рис.5, спутник В2 приблизился к спутнику В1 настолько, что оказалось возможным взаимодействие между протяженной атмосферой гиганта К7 и пылевой оболочкой спутника F2. Схема, показанная на рис.5, позволяет приблизиться к решению еще одного вопроса: откуда берется пыль вокруг спутника В1? Вероятно, она "перекачивается" из атмосферы спутника В2 во время сближения.

На рис.6 показана диаграмма Герцшпрунга-Рессела, на которую нанесены главная звезда и оба спутника. Из диаграммы можно заключить, что главная звезда, как это неоднократно отмечалось разными авторами, имеет аномально малый радиус и относится скорее к субкарликам, чем к звездам начальной Главной последовательности. Спутник В1 близок к изохроне 1 млн. лет, а спутник В2 находится вблизи линии рождения звезд. Получается, что звезды имеют разный возраст. Объяснить это можно либо тем, что кратность звезды настолько сильно повлияла на эволюцию, что треки, построенные для одиночных звезд, в данном случае непригодны; либо тем, что один или оба спутника захвачены главной звездой. Последнее вероятно, поскольку в этой области пространства чрезвычайно высока плотность звездного населения.

Интересен следующий вопрос: возможно ли обнаружить линии

спутника В2 в спектре, что позволило бы определить его физические характеристики? Расчеты показывают, что это крайне сложно. В области полосы V этому препятствует сравнительно большая скорость вращения и малая относительная светимость. В области полосы B линии спутника

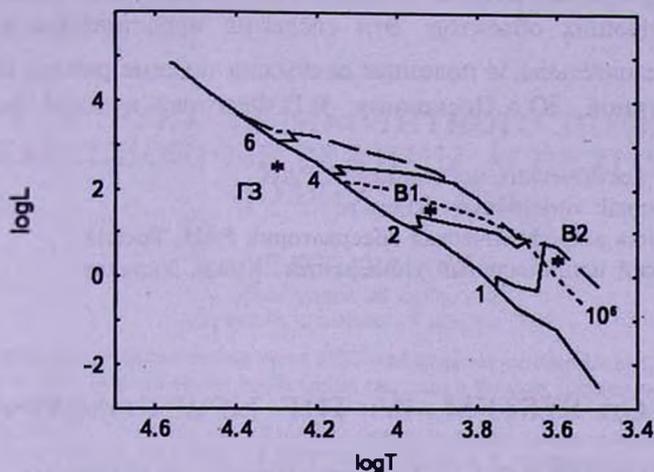


Рис.6. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела согласно [11]. Прерывистая линия - линия рождения звезд, пунктиром показана изохрона для возраста 10^6 лет. Сплошная кривая - начальная Главная последовательность. Массы звезд нанесены у левого конца треков. Звездочки - компоненты системы. ГЗ - главная звезда.

В2 не обнаружимы в силу экспоненциального уменьшения монохроматической яркости в коротковолновую сторону. В более длинноволновой области резко уменьшается число и интенсивность линий, увеличивается вклад линий спутника В1 и вклад излучения пыли. Кроме того, уменьшается абсолютная чувствительность приемной аппаратуры и возрастают тепловые шумы.

7. Заключение. Существование спутника В2 не вызывает сомнений. Он был открыт по аномалии лучевой скорости главной звезды и спутника В1. Метод кросс-корреляции достоверно подтверждает наличие следов линий в спектре.

Тесное сближение всех трех звезд вблизи периастра может быть причиной нестабильности кривой блеска и спектра, стимулирует процесс

Таблица 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ

Величины	В	В1	В2	Пыль
Температура, К	20000	7000	4000	640
Радиус, R_{\odot}	2.5	8.4	16	140
Масса, M_{\odot}	6.3	2.5	1.8:	
M_p	$-2^{\pm 0.3}$	$+0^{\pm 0.3}$	$+4^{\pm 0.0}$	

"испарения" спутника В2, протяженная атмосфера спутника В2 может быть источником пыли, окружающей спутник В1, что приводит к весьма необычному затмению.

Основной результат работы - определение физических компонентов четырех излучающих объектов. Эти сведения представлены в табл.2.

Авторы признательны за полезные дискуссии по теме работы Н.И.Бондарь, О.Б.Костиной, Ю.А.Посконину, В.П.Федотову и Ю.М.Чеснокову.

¹ Институт космических исследований РАН,
Россия, e-mail: vitrich@nserv.iki.rssi.ru

² Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Россия

³ Таврический национальный университет, Крым, Украина

THE BM Ori SYSTEM. IV. THE NEW COMPONENT

E.A.VITRICHENKO¹, V.G.KLOCHKOVA², V.V.TSYMBAL³

By the application of the cross-correlation method between observed and synthetic spectra one more component BM Ori system has been found out with the following characteristics: effective temperature $T_{\text{eff}} = 4000$ K, radius $R = 16 R_{\odot}$, mass $M = 1.8 M_{\odot}$, spectral type K7 III, absolute bolometric magnitude $M_b = +4^{\text{m}}.0$, axial rotation $V \sin i = 85$ km/s, relative luminosity near to V band is equal 0.005.

Key words: *stars: eclipsing binary: Orion Trapezium*

ЛИТЕРАТУРА

1. D.M.Popper, M.Plavec, *Astrophys. J.*, 205, 462, 1976.
2. Э.А.Витриченко, С.И.Плацинда, Письма в Астрон. ж., 26, 456, 2000.
3. Э.А.Витриченко, В.Г.Клочкова, Письма в Астрон. ж., 27, 381, 2001.
4. Э.А.Витриченко, В.Г.Клочкова, *Астрофизика*, 47, 169, 2004.
5. Э.А.Витриченко, Трапеция Ориона, Наука, М., 2004.
6. L.R.Penny, *Astrophys. J.*, 463, 737, 1996.
7. V.Straizys, G.Kuriliene, *Astrophys. Space. Sci.*, 89, 353, 1981.
8. Э.А.Витриченко, В.М.Ларионов, Письма в Астрон. ж., 22, 178, 1996.
9. R.C.Bohlin, B.D.Savage, *Astrophys. J.*, 249, 109, 1981.
10. L.M.Close, F.Wildi, M.Lloyd-Hart et al., *Astrophys. J.*, 599, 537, 2003.
11. F.Pala, S.W.Stahler, *Astrophys. J.*, 525, 772, 1999.