

УДК: 524.387

СИСТЕМА ВМ Ori. III. ГЛУБИНА МИНИМУМА В ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Э.А.ВИТРИЧЕНКО

Поступила 10 мая 2005

Принята к печати 12 августа 2005

Изучена глубина минимума затменной системы ВМ Ori в ИК-области спектра. Для этой цели выполнены наблюдения в полосах *JHKLM* вне затмения и в полосах *JHKL* вблизи центральной фазы затмения. Обнаружена сложная зависимость глубины минимума от длины волны. Эта глубина в коротковолновой области спектра от полосы *U* до *R* (λ 0.36-0.71 мкм) уменьшается, что объясняется в рамках гипотезы о затмении главной звезды пылевой оболочкой вокруг спутника и диском спутника. В ИК-области от полосы *I* до *L* (λ 0.97-3.5 мкм) глубина минимума резко возрастает. Эффект можно объяснить частичным экранированием диском спутника горячей области пылевого облака.

1. *Введение.* Кратная система ВМ Ori (= HD 37021 = θ^1 Ori B) является членом Трапеции Ориона и привлекает к себе особое внимание. В первую очередь это связано с тем, что в системе наблюдается полное затмение, и это затмение не удастся объяснить как обычное. Дело в том, что во время полной фазы затмения горячей звезды заведомо более холодной звездой спектр остается таким же, как и вне затмения, а именно - спектром горячей главной звезды. Приходится предположить, что спутник окружен полупрозрачной пылевой оболочкой, которая и производит затмение. Возможно, что вблизи центральной фазы затмения диск спутника также частично экранирует главную звезду [1,2].

Другая интересная особенность системы - она шестикратная. Как двойная затменная система звезда ВМ Ori впервые изучалась в работах [3,4], визуальный спутник на расстоянии 0".8 от затменной пары обнаружен в [5]. Этот спутник был разрешен на две звезды [6] и обнаружен еще один визуальный спутник [7] и, наконец, по невязкам лучевой скорости был найден шестой член системы [8]. Эта звезда имеет довольно экзотическую орбиту: эксцентриситет близок к единице, периастр находится в области орбит компонентов затменной системы. Либо эта звезда находится на последней стадии "испарения" из системы, либо недавно захвачена. За последние годы выполнено несколько интересных работ по вопросу о кратности системы ВМ Ori.

В недавней работе Клоза и др. [9] выполнены наблюдения с адаптивным телескопом, звезда В1 разрешена на два компонента и

обнаружено их обращение, а также предложена интересная идея: система ВМ Ог₁ является мини-скоплением, из которого "испаряются" звезды малых масс, которые и образуют одиночные звезды поля.

Результаты исследования системы по состоянию на 2002г. содержатся в книге автора [10].

В работе [11] предложено несколько критических экспериментов, позволяющих подтвердить или опровергнуть гипотезу о затмении пылевым облаком. Один из них - определение глубины главного минимума в ИК-области спектра. Если, например, окажется, что глубина минимума плавно уменьшается с длиной волны, то гипотеза об околосреднем пылевом облаке несостоятельна. В таком случае ИК-избыток, вероятнее всего, образуется в облаке, окружающем всю систему в целом. Если же пылевое облако расположено вокруг спутника, то следует ожидать особенности в зависимости глубины минимума от длины волны, которые связаны с участием пылевого облака в затмении.

Впервые зависимость глубины минимума Δm от длины волны в диапазоне полос от U до I изучена в [12]. В координатах (Δm , $1/\lambda$) эта зависимость хорошо представляется прямой линией. В работе [13] исследована зависимость Δm от величины поглощения пылью на единицу геометрической толщины $A(\lambda)$ в этом же спектральном диапазоне. Авторы показали, что затмение невозможно объяснить, предполагая только экранирование главной звезды пылевым облаком с нормальным законом поглощения. Приходится предполагать, что либо поглощение пылью частично не селективно, либо в затмении кроме пыли участвует и спутник.

В более длинноволновой области спектра глубина минимума ранее не изучалась.

Первые наблюдения ВМ Ог₁ в ИК-области спектра выполнили Ней и др. [14] в полосах $KLMQ$ (λ 2.2-10.7 мкм). Эти наблюдения совместно с новыми наблюдениями были использованы для построения распределения энергии в непрерывном спектре звезды [11]. Сравнение наблюдений Ней и др. с наблюдениями авторов выявило расхождение до $\sim 1^m$. Объяснение этому расхождению не было найдено. Одна из возможных причин - измерения в некоторых полосах были выполнены в области затмения. Предположение невозможно проверить, поскольку в статье [14] не приведены моменты наблюдений. Другими причинами могут быть переменность компонентов двойной звезды, туманности вблизи звезды или оптического спутника Θ^1 Ог₁ В1 [5].

В данной работе изучена зависимость глубины минимума от длины волны в широком спектральном диапазоне с целью поисков проявлений пылевой оболочки. Приведены новые наблюдения ВМ Ог₁ в полосах

JHKLM вне затмения и в полосах *JHKL* вблизи центральной фазы затмения, оценена глубина минимума в ИК-области спектра и обсуждается аномальное поведение глубины минимума с длиной волны для полос от *U* до *L*.

Предварительные результаты были опубликованы в [15].

2. *Наблюдения.* Наблюдения получены В.М.Ларионовым на ИК-фотометре, принадлежащем Астрономическому институту Санкт-Петербургского университета, в 1994-1997гг. в полосах *JHKLM*. Фотометр установлен на телескопе АЗТ-8 Крымской астрофизической обсерватории.

В табл.1 приведены сведения обо всех наших наблюдениях, включая и опубликованные ранее [11]. В первой строке рядом с названием полосы в скобках приведена эффективная длина волны в мкм. В третьем столбце дана фаза, вычисленная с элементами, приведенными

Таблица 1

НАБЛЮДЕНИЯ ВМ Оп В ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА

№	JD 2440000+	Фаза	<i>J</i> (1.25)	<i>H</i> (1.62)	<i>K</i> (2.2)	<i>L</i> (3.5)	<i>M</i> (4.7)
1	9629.619	0.212	6 ^н .6(1)	6 ^н .3(1)	5 ^н .9(1)	4 ^н .9(1)	4 ^н .5(1)
2	9633.568	0.822	6.5(1)	6.2(1)	6.0(1)	5.3(1)	4.9(1)
3	10395.497	0.575	6.67(3)	6.25(3)	5.89(2)	5.23(5)	4.5(2)
4	10396.506	0.731		6.26(2)	6.12(6)	5.3(1)	
5	10397.479	0.882	6.56(6)	6.23(8)	5.94(8)	5.5(1)	4.8(3)
6	10404.518	0.969	6.97(6)	6.43(2)	5.94(3)	4.96(6)	
7	10758.552	0.684	6.56(3)	6.36(3)	5.99(3)		
8	10759.517	0.833	6.49(3)	6.20(4)	5.86(2)	5.61(6)	5.0(1)
9	10760.523	0.989	7.19(8)	7.05(3)	6.39(6)	6.2(1)	
	m_0		6.56(3)	6.26(2)	5.96(4)	5.3(1)	4.7(1)
	Δm		0.70(8)	0.85(3)	0.53(6)	0.6(1)	

в работе [13]. Далее даны наблюдения, рядом со звездными величинами в круглых скобках приведены ошибки в единицах последнего знака. Наблюдение под номером 9 относится к фазе полного затмения. Наблюдение с номером 6 расположено на нисходящей части кривой блеска. В предпоследней строке приведен внезатменный блеск, в последней - глубина минимума.

В связи со значительным разбросом наблюдений в полосе *L* глубина минимума для всех полос Δm определялась как разность блеска между 9-м и 8-м наблюдениями, полученными в соседние даты, с целью уменьшить влияние возможной переменности главной звезды и ее спутников. Среднее значение внезатменного блеска m_0 было вычислено с использованием всех наблюдений, за исключением 6-го и 9-го, которые попадают в фазу затмения.

3. *Поведение глубины минимума с длиной волны.* На рис.1 показано изменение глубины минимума с длиной волны. Для полос от *U* до *I* глубина минимума взята из работы [11].

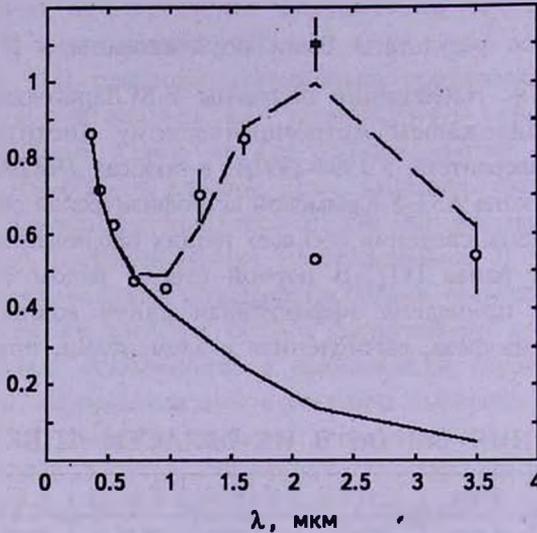


Рис.1. Изменение глубины минимума $VM O_{11}$ с длиной волны. Кружки - наблюдения, сплошная линия - глубина минимума, вычисленная по уравнению (1), штриховая - по уравнению (2). Звездочка - глубина минимума в полосе *K*, исправленная за излучение оптического спутника. Отрезками показаны величины ошибок.

На этом рисунке кружками показаны наблюдаемые глубины минимумов. Сплошной линией нанесена вычисленная глубина минимума в предположении, что для всех длин волн пылевой оболочкой закрывается одинаковая часть главной звезды. Вычисления выполнены по формуле:

$$\Delta m = -2.5 \log[(1 - \alpha_0) L_1 + L_2 + L_3], \quad (1)$$

где Δm - разность звездных величин в центральной фазе затмения и вне затмения, $\alpha_0 = 0.63$ - максимальная фаза затмения, L_1 - блеск главной звезды (относительная светимость), L_2 - блеск спутника, L_3 - блеск пылевой оболочки. Величины блеска в зависимости от длины волны взяты из статьи [3]. Формула (1) описывает глубину минимума для частного затмения в рамках гипотезы *U* [16]. При этом не учитывается вклад остальных четырех звезд системы.

Из рис.1 видно, что зависимости (1) удовлетворяют все наблюдения в полосах от *U* до *R*. Для всех полос от *I* до *L* глубина минимума значительно больше, чем предсказывается формулой (1).

Для объяснения этого явления воспользуемся результатами расчета температуры в пылевой оболочке [2]. В указанной работе было показано, что эта оболочка, вероятнее всего, состоит из твердых кварцевых частиц. Часть оболочки, обращенная к главной звезде, нагрета до температуры

~2000 К. Предположим, что вблизи центральной фазы затмения диск спутника частично закрывает эту наиболее горячую область. Тогда глубину минимума можно определить по формуле:

$$\Delta m = -2.5 \log[(1 - \alpha_0) L_1 + L_2 + L_3 - \beta L_4], \quad (2)$$

где L_4 - чернотельное излучение горячей пыли с температурой 2000 К и эквивалентным радиусом $48 R_{\odot}$ [11]. Множитель $\beta = 0.45$ - доля объема горячей пыли, закрытая диском спутника. Температура нагретой пыли и множитель β подбирались так, чтобы получить наилучшее согласие между теоретической и наблюдаемой зависимостями глубины минимума от длины волны.

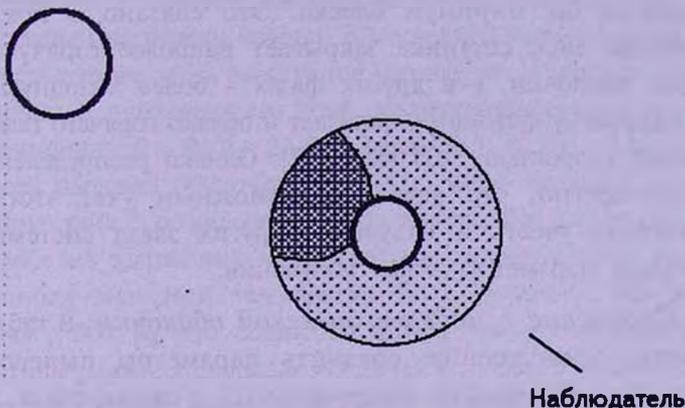


Рис.2. Схема центральной фазы затмения. Жирными окружностями показаны звезды, окружность с тонкой линией - наружная граница пылевой оболочки вокруг спутника, дуговыми линиями выделена область с наиболее горячей пылью.

На рис.2 приведена схема, поясняющая этот эффект. Здесь слева сверху показана главная звезда, справа внизу - спутник с оболочкой.

Вернемся к рис.1. Из него видно, что теоретическая зависимость (2) удовлетворительно согласуется с наблюдаемыми глубинами минимума в полосах от U до L (за исключением полосы K). Скачок глубины минимума в полосе K можно связать с тем, что рядом со звездой ВМ Огі на расстоянии $0''.8$ расположена звезда Θ^1 Огі В1 [5]. В дальнейшем назовем эту звезду ИК-спутник, в отличие от спутника двойной системы ВМ Огі. Этот объект попадает в диафрагму фотометра, которая составляет $8''$, и его излучение приводит к уменьшению глубины минимума.

Оценим вклад излучения ИК-спутника. Для ВМ Огі в указанной работе приведено значение блеска $K' = 6^m.43$. Штрих обозначает, что измерения относятся к инструментальной системе. Для ИК-спутника $K' = 7^m.53$. Разность блеска ВМ Огі и спутника составляет $\Delta K' = 1^m.10$. В дальнейшем штрих у величины K будем опускать, пренебрегая поправкой для перевода инструментальной системы в стандартную систему

($-0^m.03$). Истинную глубину минимума Δm_0 вычислим по формуле:

$$\Delta m_0 = \Delta m + \Delta K - 2.5 \log(1 + 10^{0.4\Delta K} - 10^{0.4\Delta m}) = 1^m.08, \quad (3)$$

где Δm - наблюдаемая глубина минимума в полосе K . Исправленное наблюдение глубины минимума для этой полосы показано на рис.1 звездочкой. Это наблюдение согласуется в пределах ошибок с теоретической кривой, вычисленной по формуле (2). Таким образом, удалось согласовать все имеющиеся наблюдения глубины минимума в полосах от U до L ($\lambda\lambda$ 0.36-3.5 мкм) с зависимостью (2).

Из формулы (3) следует, что если бы в главном минимуме главная звезда не затмевалась пылевой оболочкой, то в полосе K все равно наблюдался бы минимум блеска. Это связано с тем, что вблизи соединения диск спутника закрывает наиболее горячую часть своей пылевой оболочки, а в других фазах - более холодную.

В диафрагму фотометра попадает и облако горячего газа, движущееся с лучевой скоростью ~ 100 км/с [17]. Однако распределение энергии в нем неизвестно, что делает невозможным учет этого излучения. Невозможно учесть и излучение других звезд системы, поскольку неизвестны параметры этого излучения.

4. *Сравнение с моделью пылевой оболочки.* В табл.2 приведены сведения, позволяющие сравнить параметры пылевой оболочки, вычисленные по моделям Витриченко [2], с параметрами, полученными здесь из анализа глубин минимумов. В указанной работе получено

Таблица 2

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕВОЙ ОБОЛОЧКИ

Параметр	C	SiO ₂	Затмение
Температура, К	3700	1700	2000
Радиус, R_{\odot}	7	8	22

решение кривой блеска в предположении, что в максимальной фазе затмения главная звезда экранируется пылевой оболочкой, расположенной вокруг спутника, и частично (на $\sim 20\%$ площади диска главной звезды) диском спутника. Это решение не противоречит наблюдениям.

В первом столбце табл.2 приведено название параметра. Для вычисления указанных параметров в моделях оболочек, состоящих из частиц графита или частиц кварца, выделялась подзвездная область оболочки (обращенная к главной звезде), ограниченная цилиндром, опирающимся на спутник, то есть та часть оболочки, которая экранируется спутником в полной фазе затмения (см. рис.2). Для модели оболочки, состоящей из графита, область зазора между звездой и

оболочкой, где пыль испаряется, исключалась из рассмотрения.

Температура этой цилиндрической области оценивалась как среднее значение температуры в узлах квадратной сетки (по карте температур из [2]) с весовым множителем $|u|$, где u - расстояние узла от линии центров. Эквивалентный радиус пыли представляет собой радиус такой сферы, площадь которой равна суммарной площади всех пылинок. Эта величина определялась по объему выделенной области, а также по плотности частиц в единице объема и по их радиусу, приведенной в статье [2].

В столбце, обозначенном буквой С, даны сведения для модельной оболочки, состоящей из частиц графита. В следующем столбце - для оболочки, состоящей из частиц кварца. В последней колонке приведены величины, определенные здесь по глубине минимума. В качестве радиуса пылевой оболочки R приведена его доля, закрываемая диском спутника в момент соединения: $R = R_0 \cdot \beta = 22 R_0$. Здесь $R_0 = 48 R_{\odot}$ - эквивалентный радиус всей пылевой оболочки, $\beta = 0.45$ - доля закрытой ее части.

Рассмотрение табл.2 позволяет сделать вывод, что по температуре модель оболочки из кварцевых частиц лучше согласуется с моделью затмения. Ошибка значений температур не определена, но она по нашим оценкам ~ 300 К, что совпадает с разностью температур.

Эквивалентные радиусы пылевых оболочек для обеих моделей плохо согласуются с радиусами, полученными из решения кривой блеска. Но они и не должны совпадать. Эквивалентный радиус - радиус такой сферы, площадь которой равна сумме площадей пылинок. Радиус, определенный из кривой блеска, является внешним радиусом пылевой оболочки.

Нет полной уверенности и в правильности модели оболочки, поскольку неизвестен ее минералогический состав. Недавно обнаруженная шестая звезда является холодной, и учет ее излучения значительно уменьшает температуру оболочки [8]. Наконец, ИК-наблюдения получены на значительном интервале времени, поэтому глубины минимумов могут быть искажены фотометрической переменностью системы.

5. Заключение. Выполнен анализ зависимости глубины минимума от длины волны для полос от U до L . Этот анализ показал, что в коротковолновой области спектра (в полосах от U до R) глубина минимума объясняется в рамках модели геометрического экранирования главной звезды пылевой оболочкой и частично спутником.

Для объяснения поведения глубины минимума от длины волны в полосах от I до L необходимо привлечь предположение, что в центральной части затмения диском спутника закрывается область горячей пыли. Если это предположение окажется верным, то тем

самым подтверждается модель пылевой оболочки, состоящей из кварцевых частиц.

Резкий скачок глубины минимума в полосе K удается объяснить, если учесть вклад в излучение ИК-спутника, попадающего в диафрагму фотометра. Но приведенное объяснение не является единственно возможным. Например, фотометрическая переменность компонентов системы может быть причиной изменения глубины минимумов.

Необходимо выполнить новые ИК-наблюдения для подтверждения найденной зависимости глубины минимума от длины волны. Представляется важным измерить глубину минимума для больших длин волн.

Интересно также получить измерения глубины вторичного минимума в ИК-области спектра. Если интерпретация поведения глубины главного минимума с длиной волны, изложенная здесь, верна, то можно ожидать значительную глубину и вторичного минимума в этой области спектра. Волф [18] получил кривые блеска $BM Ori$ в полосах $uvbyRI$ ($\lambda\lambda$ 0.35-1.03 мкм). На этих кривых блеска в полосах uv вторичный минимум определенно отсутствует, но в остальных полосах он заметен, и его глубина увеличивается с длиной волны, [19]. Этот факт является аргументом в пользу высказанных здесь предположений.

Автор благодарен В.М.Ларионову за получение наблюдательного материала, а также Н.И.Бондарь, А.А.Галееву, Н.С.Кардашеву, В.С.Бычковой, Л.И.Матвеевко, А.В.Тутукову, В.П.Федотову, В.Л.Хохловой, Г.Б.Шоломицкому и В.С.Шевченко за полезное обсуждение проблемы.

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

THE $BM Ori$ SYSTEM. III. THE MINIMUM DEPTH OF $BM Ori$ IN INFRARED

E.A.VITRICHENKO

Depth of a minimum of eclipsing binary $BM Ori$ is investigated in infrared. For this purpose observations in $JHKLM$ bands outside of an eclipse and in $JHKL$ bands near to the central phase of an eclipse are executed. Complex dependence of depth of a minimum on a wave length is found out. This depth in short-wave portion of a spectrum from band U up to R ($\lambda\lambda$ 0.36-0.71 microns) decreases, that speaks within the

framework of a hypothesis about an eclipse of the main star by a dust environment around of the secondary and a disk of the secondary. In IR region from band *I* up to *L* (λ 0.97-3.5 microns) depth of the minimum sharply grows. It is possible to explain effect partial obscuring by a disk of the secondary of hot region of a dust cloud.

Key words: *stars: eclipsing binary - Individual:VM Ori*

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.А.Витриченко, Письма в Астрон. ж., 22, 587, 1996.
2. Э.А.Витриченко, Письма в Астрон. ж., 24, 708, 1998.
3. П.П.Паренаго, Переменные звезды, 6, 217, 1947.
4. O.Struve, J.Titus, Astrophys. J., 99, 84, 1944.
5. M.J.McCaughrean, J.R Stauffer, Astron. J., 108, 1382, 1994.
6. M.G.Petr, V.C.Foresto, S.V.W.Beckwith, A.Richichi, M.J.McCaughrean, Astron. Astrophys., 347, L15, 1999.
7. M.Simon, L.M.Close, T.L.Beck, Astron. J., 117, 1375, 1999.
8. Э.А.Витриченко, В.Г.Клочкова, Астрофизика, 47, 199, 2004.
9. L.M.Close, F.Wildi, M.Lloyd-Hart et al., Astrophys. J., 599, 517, 2003.
10. Э.А.Витриченко, Трапеция Ориона, Наука, М., 2004.
11. Э.А.Витриченко, В.М.Ларионов, Письма в Астрон. ж., 22, 178, 1996.
12. М.М.Закиров, В.С.Шевченко, Переменные звезды, 21, 629, 1982.
13. Н.И.Бондарь, Э.А.Витриченко, Письма в Астрон. ж., 21, 700, 1995.
14. E.P.Ney, D.W.Strecker, R.D.Gehrz, Astrophys. J., 180, 809, 1973.
15. Э.А.Витриченко, Препр. ИКИ РАН, №1991, 1998.
16. В.П.Цесевич, Затменные переменные звезды, Наука, М., 1971.
17. R.M.Massey, J.Meaburn, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 273, 615, 1995.
18. G.W.Wolf, Experimental Astronomy, 5, 61, 1994.
19. А.С.Василейский, Э.А.Витриченко, Письма в Астрон. ж., 26, 613, 2000.