

УДК 524.386

## Абсолютная спектрофотометрия 22 Vulpeculae во время затмения 1990 г.

*В.И. Бурнашев, Б.А. Бурнашева*

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, АР Крым, Украина, 98409  
*bella@crao.crimea.ua*

Поступила в редакцию 3 сентября 2012 г.

**Аннотация.** Рассмотрены и сведены в единую систему результаты широкополосных фотометрических наблюдений системы 22 Vulpeculae (QS Vulpeculae), выполненные на протяжении 1984–1994 гг., построена сводная кривая блеска.

На основании абсолютных спектрофотометрических наблюдений системы 22 Vulpeculae сделана оценка спектральных классов компонентов и вклада каждого из них в общий блеск системы. Принятое значение поглощения в видимой области  $A(V) = 0^m.0$ .

THE ABSOLUTE ENERGY DISTRIBUTION IN SPECTRA OF 22 VULPECULAE DURING THE ECLIPSE OF 1990, *by V.I. Burnashev and B.A. Burnasheva*. The photoelectric observations during 1984–1994 were used for the construction of the common light curve for 22 Vulpeculae (QS Vulpeculae) in the photometric UBВ-system. On the base of energy distribution data spectral classes and luminosities of the components of this binary system were obtained.

**Ключевые слова:** photometry, variables, eclipsing binary star

---

## 1 Введение

Звездами с составными спектрами принято называть системы, состоящие из холодного гиганта или сверхгиганта спектрального класса  $G$ ,  $K$ ,  $M$  и горячего  $B$ ,  $A$  или раннего  $F$ -карлика. В спектральной области, доступной наземным исследованиям, обе звезды имеют сравнимую яркость, и в спектре системы присутствуют линии обоих компонентов (Бурнашев и Бурнашева, 2011, 2012).

Характерной чертой этих двойных систем являются большие периоды, исчисляемые сотнями дней и даже многими годами. Особое внимание в последние годы привлекают звезды, орбиты которых с точки зрения земного наблюдателя удачно расположены в пространстве таким образом, что время от времени более крупный поздний компонент затмевает малую яркую звезду, которая, таким образом, служит “фонарем”, просвечивающим протяженную атмосферу холодного компонента. Немногочисленный класс таких двойных называется переменными типа  $\zeta$  Aur, число которых к настоящему времени составляет около десятка.

Нами проведен анализ спектрофотометрических наблюдений затменно-двойной звезды такого рода: 22 Vul = 22 Лисички = QS Vul = HD 192713 = HR 7741, G2 Iab + B,  $V = 5.18$  (Хоффлейт и Уоррен, 1991).

Наиболее надежные в настоящее время элементы орбиты, полученные из кривой лучевых скоростей и кривой блеска (Итон и Шу, 2007; Гриффин и др., 1993):

полуамплитуда лучевой скорости позднего компонента:  $K = 27.38 \pm 0.02$  km/s,  
 гамма-скорость:  $\gamma = -20.50 \pm 0.02$  km/s,  
 средний момент затмения ранней звезды:  $JD\ 2453166.98 \pm 0.^d05$ ,  
 период:  $249.^d128 \pm 0.^d001$ ,  
 отношение масс компонентов:  $q = M_G/M_B = 1.59$ ,  
 эксцентриситет орбиты:  $e = 0$ ,  
 наклонение:  $i = 81^\circ.34 \pm 0.^o02$ ,  
 большая полуось:  $a_G = 134.2 \pm 0.02 R_\odot$ .  
 Здесь:  $R_\odot$  и  $M_\odot$  – радиус и масса Солнца.

Звезда находится на расстоянии 510 пс.

## 2 Широкополосная электрофотометрия

На затменную природу двойной обратили внимание Парсонс и Эйк (1983) на основе результатов наблюдений в фотометрическом референтном канале ( $\lambda_{eff} \approx 5200 \text{ \AA}$ ) спутника *IUE*. Они же и оценили первоначальные элементы кривой блеска. Эти элементы позднее уточнил Фолкнер (1984), который привел график изменения блеска звезды вблизи минимума.

Сводка всех имевшихся в нашем распоряжении фотоэлектрических данных приведена в табл. 1. Из этого массива для дальнейшего анализа были отобраны только наблюдения, выполненные в фотометрических системах, близких к *UBV*. Не были использованы результаты наблюдений, значительно отклоняющиеся от данных, приводимых другими авторами, а также наблюдения, выполненные в узкополосных системах.

Фотометрические данные со спутника ГИППАРКОС включают 195 оценок, полученных в течение 28 дат. Эти сведения были взяты из обширного каталога ТУСНО-2 (Хог и др., 2000). Приведенные в этом каталоге значения, относящиеся к исследуемой звезде, редуцированы в систему *UBV*. Около сотни оценок сделаны Нольтенисом (1991) вблизи главного минимума в течение 17 ночей.

Таблица 1. Фотоэлектрические наблюдения 22 *Vul* (*QS Vul*)

Время наблюдений JD2440000+	Фотометрическая система	Число наблюдений	Лит. ссылка
–	IUE(FES-5200 A)	–	Парсонс и Эйк, 1983
5936–5952	<i>U, B, V</i>	8, графич.	Фолкнер, 1984
5929.677–5964.612	<i>V, uvbyβ, R, I</i>	11	Ферни и Лион, 1985
5937.84–5972.70	<i>U, B, V</i>	11	Скарфи и Робб, 1985а
6183.979–6200.963	<i>U, B, V</i>	7	Скарфи и Робб, 1985b
8174.72053–8206.60487	<i>U, B, V</i>	93(17)	Нольтенис, 1991
7898.55206–8978.46470	<i>B, V</i>	195 (28)	“ГИППАРКОС”, Хог и др., 2000
8075.44–8183.25	<i>U, B, V</i> – спектрофот.	13	Бурнашев, Бурнашева, наст. том

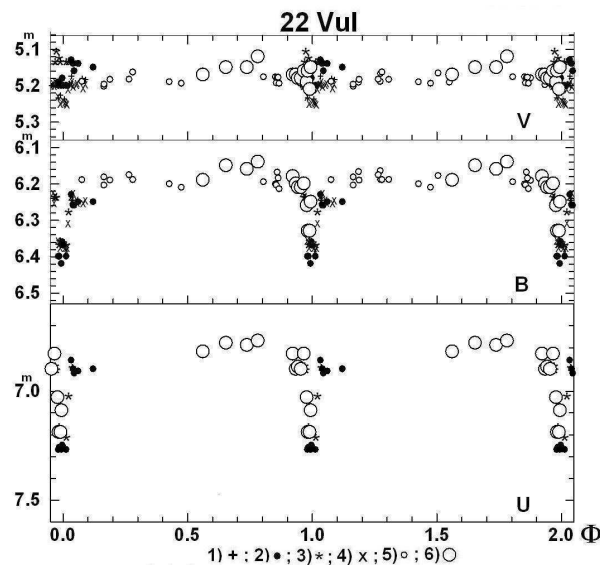
В первой колонке табл. 1 указан соответствующий интервал наблюдений, во второй – примененная фотометрическая система. Отметим, что зачастую, если в одну дату данным автором были сделаны несколько наблюдений, для дальнейшего анализа принималось среднее значение для данной ночи. Число ночей, в течение которых проводились наблюдения, указано в скобках. В четвертой колонке приводится соответствующая литературная ссылка.

Большая часть наблюдений сделана дифференциальным способом с помощью разных звезд сравнения, что, вообще говоря, может быть также еще одним источником ошибок.

Например, Фолкнер (1984) и Нольтенис (1991) в качестве звезды сравнения взяли 24 *Vul* (*G8III*,  $5.^m32$ ), Ферни и Лион (1985), Скарфи и Робб (1985 а, b) применили *HD* 192712 (*G5*,  $7.^m15$ ). Отметим, что для одних и тех же звезд сравнения приводимые значения звездных величин могут различаться до  $\Delta V = 0.^m03$ , что, вероятно, можно считать средней ошибкой фотометрических данных.

Оценки блеска в широкополосной системе можно получить также и путем перемножения кривых распределения энергии в спектре переменной и стандартной кривой реакции системы. О такой “синтетической фотометрии”, в том числе и в области заатмосферного ультрафиолета, более подробно будет сказано ниже.

*UBV*-величины, вычисленные таким образом, с помощью кривых реакции системы *UBV*, опубликованных в монографии Страйжиса (1977) и результатов абсолютной спектрофотометрии для 22 *Vul*, полученных в Крымской обсерватории в 1990 г. (JD 2448075–2448183), также вошли в число наблюдательных данных, которые располагаются на сайте Крымской обсерватории: <http://www.crao.crimea.ua/~aas/> (Бурнашев, Бурнашева, 2009).



**Рис. 1.** Сводная кривая блеска 22 *Vul* (*QSVul*). 1– Ферни и Лион, 1985; 2 – Скарфи и Робб, 1985 а; 3 – Скарфи и Робб, 1985 b; 4 – Нольтенис, 1991; 5 – “ГИППАРКОС”; 6 – крымские наблюдения

На рис. 1 приводится фазовая кривая блеска, построенная по опубликованным результатам фотоэлектрической фотометрии и данным каталога ГУСНО-2. Крымские наблюдения указаны кружками. Фазы вычислены с помощью элементов Итона и Шу (2007):  $JD = 2443207.86 + 249^d128 P$ .

В значительной степени заметный разброс приводимых данных вызван также и тем, что звезда обладает пекулярным распределением энергии, затрудняющим редукции за поглощение в земной атмосфере и приведение к стандартной фотометрической системе. Поэтому свертка его с каноническими кривыми реакции системы *UBV* будет отличаться от свертки с кривыми реакции фотометров, применяемых на разных обсерваториях, представляющих реальные наблюдения. Эта причина и обуславливает большую часть наблюдаемых расхождений.

Особо отметим, что Итон и Шу (2007) построили кривую блеска на основе наблюдений, выполненных с помощью автоматического фотометрического телескопа на обсерватории Вандербильт

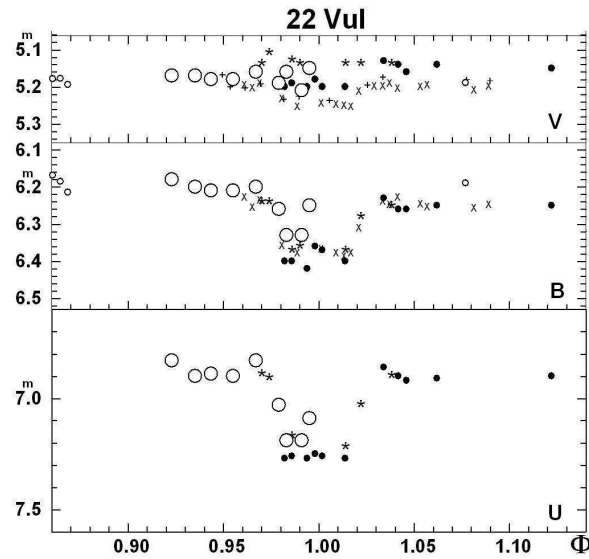


Рис. 2. Изменение блеска звезды вблизи главного минимума. Обозначения такие же, как на рис. 1

университета штата Теннесси в течение нескольких сезонов. К сожалению, эти данные приводятся только в графическом виде. Средняя точность одного наблюдения в полосе  $V$  оценена ими как  $\pm 0.^m005$ . Такой большой ряд точных оценок блеска позволяет оценить эффект эллипсоидальности главного компонента, который составляет величину около  $0.^m02$  в полосе  $V$  (Итон и Генри, 1994; Итон и Шу, 2007).

На рис. 2 более подробно показана часть кривой, относящаяся к фазе главного минимума. Кружками отмечены значения, вычисленные на основании крымской спектрофотометрии. При этом следует отметить, что наши данные о распределении энергии в спектре звезды начинаются с длины волны  $3350 \text{ \AA}$ , поэтому приводимые на рис. 1 и 2 вычисленные нами величины  $U$  могут быть несколько завышены.

### 3 Абсолютное спектрофотометрическое исследование и синтетическая фотометрия

Спектрофотометрическое исследование переменной предпринято нами в широком спектральном диапазоне на основе опубликованных результатов наблюдений, выполненных с помощью спутника IUE, а также наземной спектрофотометрии.

Абсолютные спектрофотометрические наблюдения  $22 \text{ Vul}$  в видимом диапазоне были проведены в Крымской обсерватории в 1990 году как в течение внезатменной фазы, так и во время затмения. Наблюдения выполнены методом фундаментальной спектрофотометрии, разработанным В.Б. Никоновым (1975) и традиционно применяемым в Крымской астрофизической обсерватории. Результаты абсолютной спектрофотометрии различных звезд, в том числе и исследуемой двойной системы, полученные в течение ряда лет, заинтересованный читатель также может найти на вышеупомянутом сайте Крымской астрофизической обсерватории: <http://www.crao.crimea.ua/~aas/>.

На рис. 3 показаны графики распределения энергии, полученные на спутнике IUE для двух двойных систем, в излучении которых в ультрафиолетовой области преобладает ранний  $B$ -компонент:  $HR 6902$  и  $22 \text{ Vul}$  (Хог и др., 2000).

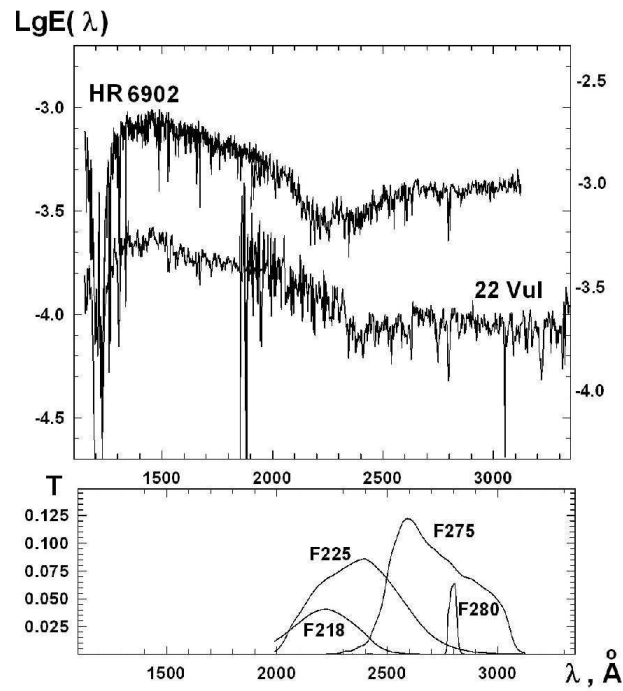


Рис. 3. Распределение энергии в ультрафиолетовой области для *HR 6902* и *22 Vul* (*HR 7741*). Кривые пропускания фильтров фотометра WFC3 показаны в нижней части рисунка

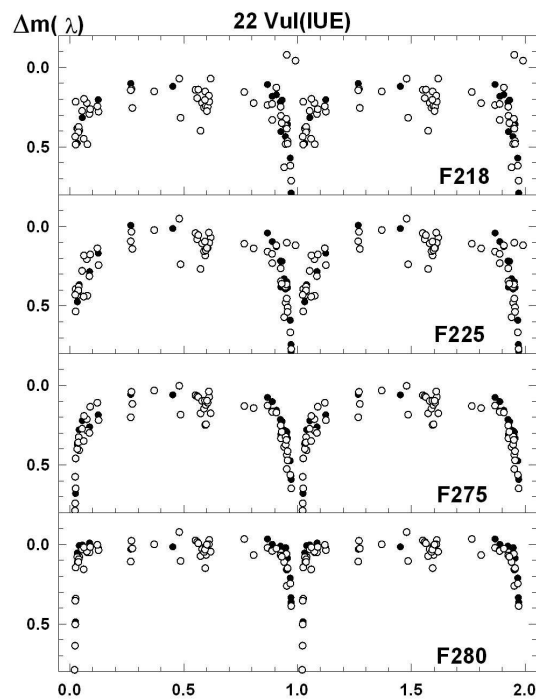


Рис. 4. Расчетные кривые блеска *22 Vul* в ультрафиолетовой области для полос, соответствующих фотометру широкого поля *HST*(WFC3)

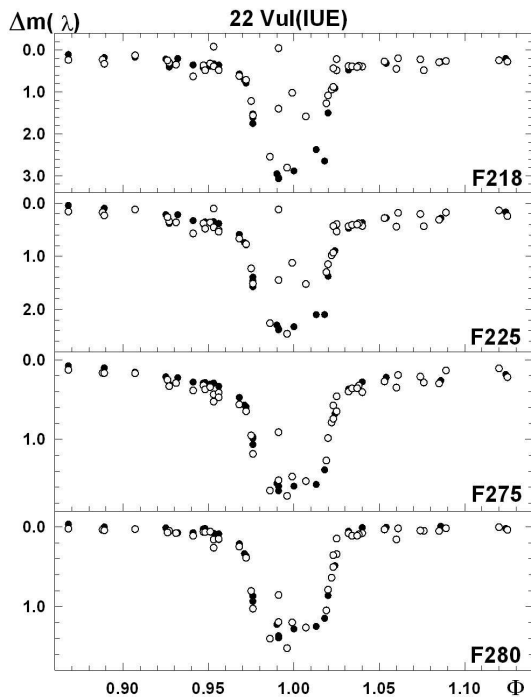


Рис. 5. Кривые блеска *22 Vul* в ультрафиолетовой области вблизи главного минимума по данным *IUE*

В нижней части графика приводятся кривые пропускания фильтров, примененных на камере поля WFC3 (Wide Field Camera, 3-d modification) космического телескопа HST (<http://www.stsci.edu/hst/wfc3/>). Полосы фотометра центрированы на различные спектральные особенности, характерные для звезд разных спектральных классов. Фотометрическая полоса *F218* примерно соответствует положению широкой межзвездной особенности  $\lambda$  2200, применяемой для оценки межзвездного поглощения. На рис. 3 заметно, что в спектре ранее изучавшейся нами звезды *HR 6902* эта особенность гораздо более интенсивна, чем в спектре *22 Vul*, где ее следы практически незаметны. Поэтому для двойной системы *22 Vul* влиянием межзвездного поглощения можно пренебречь. Мы приняли для нее нулевое значение:  $A(V) = 0^m.0$ .

Следует отметить, что на спектрах отчетливо заметна еще одна депрессия около  $\lambda$  2400–2500 Å, обусловленная сгущением нескольких десятков резонансных линий, происходящая из-за дополнительного поглощения в околосредном облаке (Гурздян, Рустамбекова, 1980). Довольно широкая полоса *F225* может быть применена для оценки интенсивности этой спектральной особенности, в частности, для целей спектральной классификации (Бурнашев и Бурнашева, 2012). Полоса *F275* может быть применена для оценки уровня непрерывного спектра до бальмеровского предела. Узкополосная система *F280* предназначена для оценки интенсивности дублета магния *Mg II*.

В обзорах Басера (1986) и Страйжиса (1996) изложены принципы синтетической фотометрии, особенно успешно применяемой в последние годы для изучения звездных населений в широком спектральном интервале.

С помощью опубликованных данных в каталоге INES можно вычислить синтетические кривые блеска *22 Vul* в ультрафиолетовой системе, реализованной на *HST*. Кривые блеска, относящиеся к фазам максимального блеска, показаны на рис. 4.

Более подробно изменение блеска изучаемой двойной системы, относящееся к фазам вблизи главного минимума, приводится на рис. 5.

Как выяснилось при обработке наблюдательного материала, полученного на *IUE*, абсолютная калибровка спектров высокого разрешения гораздо менее надежна, чем для спектров низкого разре-

шения. Поэтому мы сочли необходимым отметить данные синтетической фотометрии, полученные по спектрам высокого и низкого разрешения, разными значками на рис. 4 (кружки и точки относятся к данным высокого и низкого разрешения соответственно).

Как видно из рисунков, кривая блеска в главном минимуме имеет заметную асимметрию: более крутой вход в минимум и пологий выход.

Кроме того, обращает на себя внимание заметное уменьшение блеска задолго до минимума, особенно в полосе  $F225$ , соответствующей сгущению резонансных линий (Гурзадян и Рустамбекова, 1980) и в полосе  $F275$  в области перед бальмеровским скачком.

Возможно, что, как и в случае других звезд типа  $\zeta$  Aur, здесь имеет место экранирование света от звезды неравномерно распределенной околозвездной материей: несколько уплотненной в направлении движения по орбите и неравномерно растянутого “хвоста” (Бурнашев и Бурнашева, 2011).

#### 4 Спектральная классификация компонентов двойной системы

Для оценки вклада отдельных компонентов в общее излучение системы существуют различные методы как с применением высокодисперсионных спектров, так и широкополосных фотометрических измерений. Расширение доступного для исследований спектрального диапазона от инфракрасной области до области заатмосферного ультрафиолета в последние годы значительно облегчили ситуацию. Стало возможным не только определить вклад компонентов в общее излучение конкретной двойной системы, но и оценивать влияние межзвездного поглощения. Результаты применения разных методов для изучения двойной звезды 22 *Vul* суммированы в табл. 2.

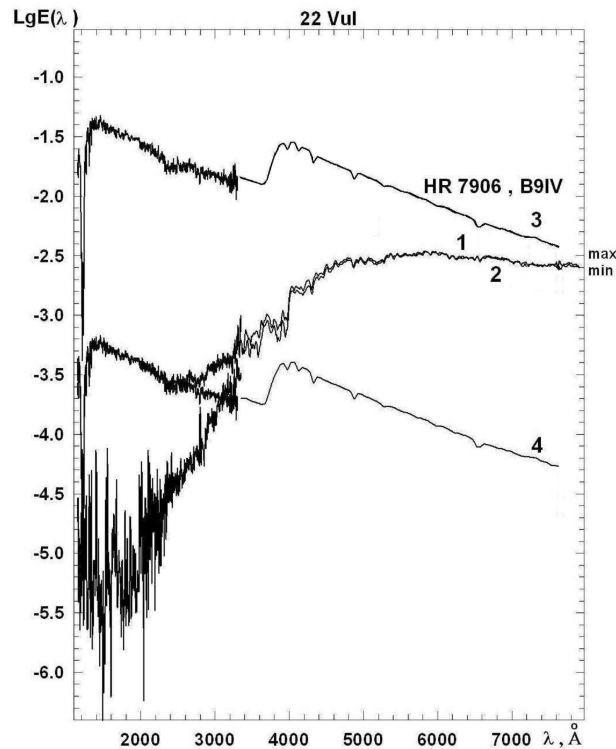
**Таблица 2.** Спектральная классификация двойной системы 22 *Vul*

Сп. класс	Лит. ссылка	$E_{BV}$	$\Delta V$
G3 Ib + B9	Парсонс, Эйк, 1983		
G3 Ib-Pr + ?	Кинан, МакНейл, 1989	–	–
G5Ib + B8V	Гриффин и др., 1993	0.04	3.4
cG7 + B9	Парсонс и Эйк, 1998	0.04	3.2
G4Ib + B8.5V	Жэнисэ и др., 2002	0.05	3.4
G4 Ib-II + B8V	Бурнашев, Бурнашева, наст. том.	0.0	3.6
G4 Ib-II + B9IV (B8III)		0.0	3.4

Методика оценки спектральных классов на основе широкополосной фотометрии была разработана Бангом (1958). Гриффин и Гриффин (1986) детально описали метод исследования звезд с составными спектрами на основе спектров высокой дисперсии. В результате применения этого метода можно определять эквивалентные ширины сильных линий и относительные лучевые скорости компонентов, получая тем самым их массы. Бааде (1998), Парсонс и Эйк (1999) использовали эту методику при наблюдениях в области вакуумного ультрафиолета. Несколько модернизировали этот метод Жэнисэ и Каркийа (2002), которые для классификации главной звезды системы применили наблюдения в ближней инфракрасной области (8370–8870 Å), где вклад раннего компонента в общее излучение минимален.

Кривые распределения энергии в спектре исследуемой звезды в широком диапазоне, включающем как внеатмосферные наблюдения, так и наземную спектрофотометрию, показаны на рис. 6, где приводятся данные о распределении энергии в спектре 22 *Vul* как в главном минимуме, так и в максимуме блеска.

По причине заметной эллипсоидальности главного компонента, для оценки вклада ранней звезды в общее излучение системы из всего ряда наблюдательных данных нами выбраны внеатмосферные спектрофотометрические кривые, относящиеся к моментам, близким к внутреннему соединению,



**Рис. 6.** Распределение энергии в спектре *22 Vul* (*QS Vul*) в максимуме и минимуме блеска (кривые 1 и 2). 3 – спектр стандарта *HR 7906* ( $\alpha$  *Del*). 4 – принятое распределение энергии в спектре раннего компонента

когда ранний компонент находится между главной звездой и наблюдателем: наблюдения в видимой области получены около фазы 0.565 (2.07.1990), в ультрафиолетовой области взяты средние кривые, относящиеся к моменту вблизи внутреннего соединения (фаза 0.4).

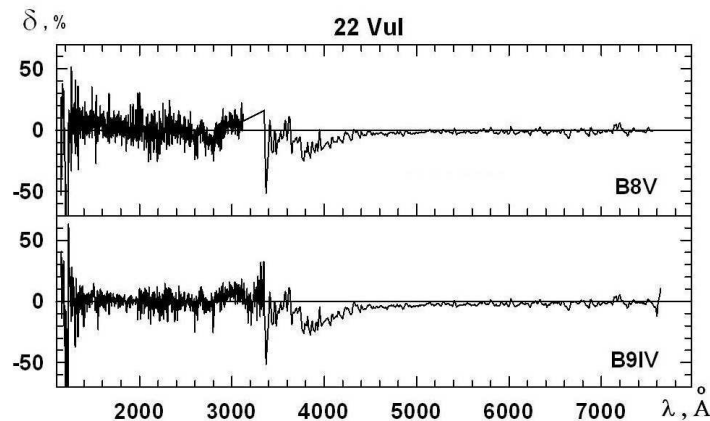
Распределение энергии вблизи внешнего соединения, когда затмевается ранний компонент, представлены в виде кривой, полученной 17.10.1990, (фаза 0.991) и ультрафиолетовыми спектрами низкого разрешения, наблюдавшимися 6.11.1992 (фаза 0.004). Специальная проверка, проведенная для ультрафиолетовых спектров *22 Vul* показала, что разброс данных, полученных в моменты, соответствующие различным фазам кривой блеска, не превышает обычных ошибок наблюдений, т. е. форма вторичного компонента не имеет заметной эллипсоидальности.

Таким образом, вычитая из кривой распределения энергии вблизи максимума блеска кривую, полученную в главном минимуме, можно оценить вклад ранней звезды в общее излучение системы.

Рисунок 6 иллюстрирует результат сопоставления абсолютной спектрофотометрии переменной вне затмения и в середине главного минимума. Здесь отмечены: 1 – внезатменное распределение энергии в спектре *22 Vul*, 2 – результат спектрофотометрии в главном минимуме. В верхней части рисунка приводится кривая 3 – распределение энергии в спектре  $\alpha$  *Del* (*B9IV*) = *HR 7906*, обладающей пренебрежимым межзвездным поглощением и принятой за стандарт при сравнении. Принимая, что спектр этой звезды идентичен спектру вторичного компонента, можно построить суммарный спектр исследуемой двойной системы. Спектр вторичного компонента на рисунке обозначен кривой 4.

Величина относительного отклонения наблюдаемого спектра от составленного указанным выше способом спектра звезды, представляющего сумму распределения энергии в минимуме вместе с добавленным к нему спектром звезды-стандарта показано на рис. 7. Для всего исследуемого спек-





**Рис. 7.** Отклонение наблюдаемого распределения энергии в спектре 22 *Vul* от вычисленного. Спектр вторичного компонента соответствует звездным стандартам ранних классов: B8V –  $\beta$  *Lib* (HR 5685) – верхняя кривая и B9IV –  $\alpha$  *Del* (HR 7906) – нижняя кривая

трального диапазона были рассчитаны две характерные комбинации: главной звезды G4 Ib-II и раннего спутника B8V или B9IV. Как видно, наилучшей, вероятно, следует признать комбинацию G4 Ib-II + B9IV.

На рисунке также обращает на себя внимание заметная деталь в области  $\lambda$  3700–4200 Å, соответствующая положению как линий ионизованного кальция, так и сгущению многочисленных линий железа. Причина ее возникновения та же самая, что и отмеченное выше дополнительное поглощение вблизи минимума в ультрафиолетовых полосах, вызванное околозвездной материей. Более подробное изучение этого фотометрического явления в полосах вашингтонской или вильнюсской-женевской системы могло бы помочь, в частности, уточнить относительные размеры этого околозвездного образования.

## 5 Выводы

Таким образом, спектрофотометрическое изучение двойной системы 22 *Vul* = *QS Vul* в широком спектральном диапазоне позволило уточнить спектральные классы и светимость компонентов, что может оказаться полезным в дальнейшем для теории звездной эволюции.

## 6 Благодарности

В работе применены данные базы INES (IUE Newly Extracted Spectra), за что авторы глубоко благодарны ее создателям. Мы выражаем также чувство искренней признательности А.А. Шляпникову за многочисленные ценные советы в процессе выполнения работы, а также Н.И. Шаховской, внимательно прочитавшей рукопись и сделавшей ряд ценных замечаний.

## Литература

- Басер (Buser R.) // Highlights of Astronomy. 1986. V. 7. P. 799.  
 Бурнашев В.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 66. С. 162.  
 Бурнашев В.И., Бурнашева Б.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009. Т. 105. С. 107.  
 Бурнашев В.И., Бурнашева Б.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. № 1. С. 7.

- Бурнашев В.И., Бурнашева Б.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2012. Т. 108. № 1 (в печати).  
Гриффин и др. (Griffin R.E.M., Hunsch M., Marshall K.P., Griffin R.F., Schroder K.-R.) // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 274. P. 225.
- Гурзадян и Рустамбекова (Gurzadyan G.A., Rustambekova S.S.) // *Astrophys. Space Sci.* 1980. V. 69. P. 269.
- Жэнисэ и Каркийя (Ginestet N., Carquillat J.M.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2002. V. 143. P. 513.
- Итон и Генри (Eaton J., Henry C.W.) // *ASP Conf. Ser.* 1994. V. 64. P. 696.
- Итон и Шу (Eaton J., Shaw F.G.) // *Astron. J.* 2007. V. 133. P. 2669.
- Никонов В.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1975. Т. 54. С. 3.
- Нольтенис (Nolthenis R.) // *Inform. Bull. Variable Stars.* 1991. № 3587. P. 1.
- Парсонс и Эйк (Parsons S.B., Ake T.B.) // *Inform. Bull. Variable Stars.* 1983. № 2334. P. 1.
- Парсонс и Эйк (Parsons S.B., Ake T.B.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1998. V. 119. P. 83.
- Скарфи и Робб (Scarfee C.D., Robb R.M.) // *Inform. Bull. Variable Stars.* 1985a. № 2668. P. 1.
- Скарфи и Робб (Scarfee C.D., Robb R.M.) // *Inform. Bull. Variable Stars.* 1985b. № 2754. P. 1.
- Страйжис (Straizys V.) // *Baltic Astronomy.* 1996. V. 5. P. 459.
- Ферни и Лион (Ferne J.D., Lyons R.) // *Inform. Bull. Variable Stars.* 1985. № 2658. P.1.
- Фолкнер (Faulkner D.R.) // *Inform. Bull. Variable Stars.* 1984. № 2599. P. 1.
- Хог и др. (Hog E., Fabricius C., Makarov V.V., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 355. L 27.
- Хоффлейт и Уоррен (Hoffleit D., Warren W.H.) // *The Bright Star Catalogue.* 5-d edition. 1991. (CDS ID V-50).