

УДК 524.33—13

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ WW Vul

Л. В. ТИМОШЕНКО, Г. К. ФИЛИПЬЕВ

Поступила 27 июля 1982

Принята к печати 25 апреля 1983

Приведены результаты фотоэлектрических *UBVR* наблюдений неправильной переменной WW Vul, полученные в течение сезонов 1978—1981 гг. и параллельных спектральных наблюдений в 1981 г., на 2-х метровом телескопе с дисперсией 94 Å/мм у H_γ. Во время наблюдений звезда большую часть времени была в активной фазе. Выявлены минимумы блеска различной глубины и продолжительности. Подтверждена двузначная зависимость между блеском и цветом. Получены спектры на разных уровнях блеска. В ослабленном блеске обнаружены изменения интенсивности линий водорода, кальция, K Ca II, и появление ультрафиолетового избытка, которые отсутствуют на восходящей ветви и в максимуме блеска. На разных уровнях блеска светимость WW Vul различна. Ставится под сомнение гипотеза экранирования звезды пылевыми частицами.

1. *Введение.* Звезда WW Vul относится к быстрым неправильным переменным с неперiodическими ослаблениями блеска. Спектральный класс ее определен Хербигом [1]—A3V.

Звезда известна как переменная с 1926 г. [2]. Уже тогда была замечена ее характерная особенность — ослабления блеска. Это послужило основанием для попыток классифицировать WW Vul как затменную типа Алголя [3], а затем как R CrB [4]. Но накопленный фотометрический материал показал сложную картину переменности, включающую в себя как быструю переменность большой амплитуды, так и остановки блеска на несколько десятков суток. В итоге WW Vul стали относить к типу RW Aur [5], а предполагавшаяся принадлежность к ассоциации Del TI [6] привлекла к ней внимание, как к представителю молодых звезд. Однако, хотя Майнунгер [7] и показал, что ассоциация Del TI нереальна и окрестности звезды характеризуются нормальным законом межзвездного поглощения [8], переменная обладает набором свойств, характерных для объектов областей звездообразования. К ним можно отнести: быструю неправильную переменность в оптическом диапазоне, наличие ИК-избытка [9] и свидетельства его переменности [10], наличие переменной двухкомпонентной

эмиссионной линии H_{α} [11, 12] и, наконец, УФ-экссесс, заподозренный Зайцевой в одном из минимумов блеска [13].

Настоящая работа посвящена анализу однородного фотоэлектрического материала и выявлению спектральных особенностей в диапазоне λ 3600 Å — 5000 Å на разных уровнях блеска WW Vul.

2. *Фотоэлектрические наблюдения.* Систематические фотоэлектрические измерения блеска переменной производились на горе Майданак в 1978—1981 гг. на телескопе АЗТ-14 (48 см). Использовались импульсные электрофотометры, реализующие систему, близкую к стандартной *UBVR* Джонсона.

Блеск WW Vul определялся по опорной звезде № 9 [8] и контролировался по звезде в $10'$ к востоку от опорной. Точность оценивалась сравнением опорной и контрольной звезд между собой с учетом различия их яркости с WW Vul. В зарегистрированном максимуме WW Vul среднеквадратичная ошибка равна 0^m03 , 0^m011 , 0^m010 и 0^m014 в *U*, *B*, *V* и *R*, соответственно. При минимальном блеске ($V = 12^m3$) значения ошибок следует увеличить в 2.7, 2.5, 2.2 и 2.4 раза.

Переменная измерялась один раз в ночь за исключением нескольких особых случаев. Подробное описание техники и методики наблюдений и таблицы с результатами фотоэлектрических измерений предполагается опубликовать отдельно [14].

Характер переменности звезды в период наблюдений иллюстрирует рис. 1. На рисунке приведены все полученные фотометрические данные. Точки соединялись между собой, если они получены в две соседние даты. Отличительной особенностью кривой блеска по нашим данным является преобладание ослаблений яркости различной глубины и продолжительности. Наиболее интересные из них выделены и пронумерованы. Встречаются ослабления блеска, имеющие сложную структуру (минимум № 6). Наблюдались и резкие минимумы продолжительностью $1^d - 2^d$ (например, минимум № 5).

В целом понижения блеска сопровождаются покраснением звезды. Но поведение показателей цвета при резких ослаблениях внушает подозрение о неоднозначной зависимости цвета от изменений блеска. Например, локальный минимум № 5 проявляет себя как «неселективный» в (*U—B*) и (*B—V*). А ослабление блеска № 3 сопровождается отчетливым увеличением всех трех показателей цвета. Интересен резкий минимум ($\Delta V = 0^m5$), наложившийся на широкое ослабление яркости № 1 в 1978 г. Он не сопровождался изменением (*B—V*) по отношению к соседним участкам кривой, а (*U—B*) даже слегка «приподнят». При этом, звезда в эту ночь измерялась еще дважды. Оказалось, что если в момент JD 2443719.21 WW Vul имела $V = 12^m87$, то при последующих измерениях

JD 2443791.34,...19.45 получены значения $V = 12^m.93$ и $12^m.94$. По-видимому, произошла остановка изменения блеска, по крайней мере, на 3—4 часа.

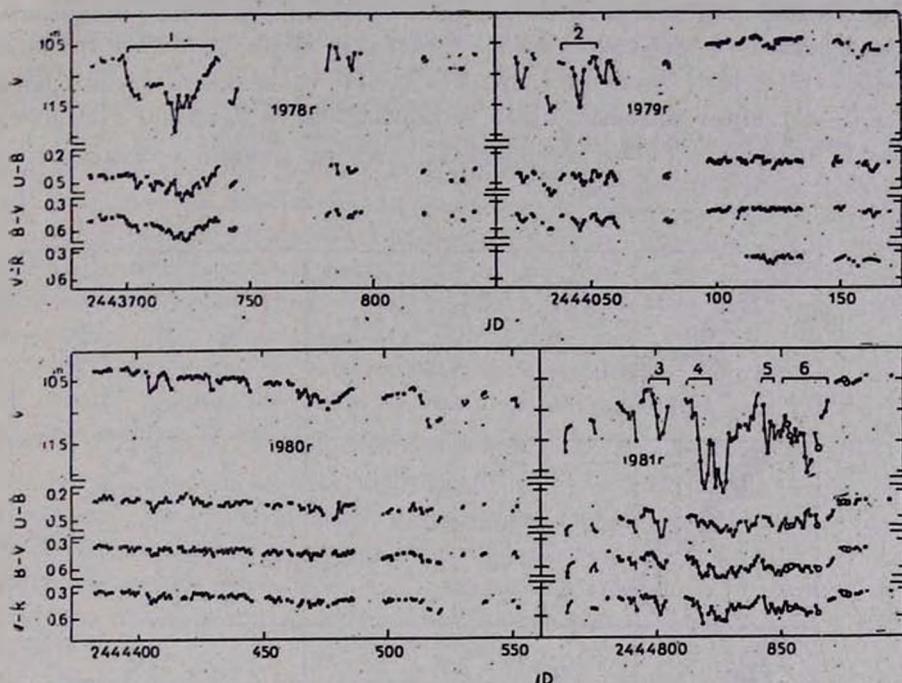


Рис. 1. Блеск WW Vul в 1978—81 гг. Открытые кружки «О» — совместные спектральные и фотометрические наблюдения 1981 г.

Наблюдения 1980 г. показали медленное уменьшение блеска WW Vul ($\sim 0^m.3$ за 100^d), на которое накладываются незначительные колебания ($\sim 0^m.1$) и неперiodические ослабления ($\Delta V \approx 0^m.3 - 0^m.5$). Таким образом, звезда в этот период показала долговременную переменность, соответствующую медленной компоненте ($\sim 100^d$), указанной в [8].

Для анализа связи индексов $(U-B)$, $(B-V)$ и $(V-R)$ с величиной V построены диаграммы (V — показатель цвета) (рис. 2). В левом вертикальном ряду диаграмм представлены зависимости цветов от блеска для всех наших данных в целом. Обращает на себя внимание большой разброс точек $(U-B)$, простирающийся широкой полосой вниз при ослабленном блеске переменной. Диаграмма для $(B-V)$ в общих чертах похожа на диаграмму $(U-B)$, но разброс точек в нижней части существенно меньше,

а на диаграмме $V-(V-R)$ в верхней части полоса даже шире, чем в нижней.

Чтобы уточнить общую зависимость показателей цвета от V , мы произвели усреднение всех цветовых индексов в пределах $\Delta V = 0^m.1$. Второй вертикальный ряд диаграмм на рисунке иллюстрирует связь усредненных колор-индексов с яркостью звезды. Отчетливо виден излом на графиках $V-(U-B)$ и $V-(B-V)$ на уровне $11^m.5$. Но зависимость на диаграмме $V-(V-R)$ имеет плавный изгиб в верхней части графика. Начиная с $V=11^m$ показатель $(V-R)$, в пределах ошибок, линейно изменяется с ослаблением блеска звезды.

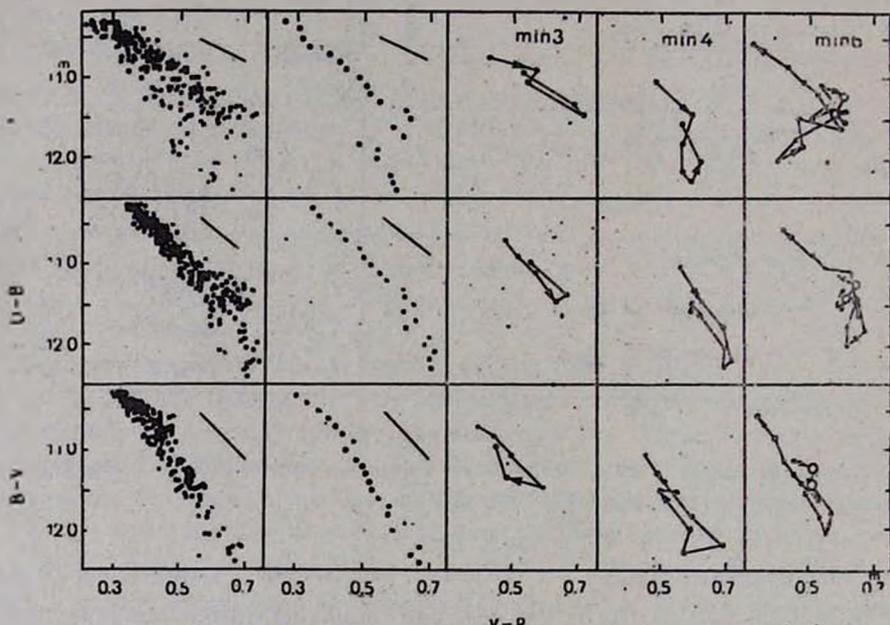


Рис. 2. Зависимости показателей цвета от величины V . Отрезки прямых — нормальный закон поглощения.

Справа на рис. 2 нанесены индивидуальные треки «величина-цвет» некоторых минимумов. Можно заметить, что наряду с ослаблениями блеска, сопровождающимися общим покраснением звезды, например минимум № 3, имеются минимумы с неоднозначной зависимостью между величиной V и цветом. В качестве примера показан минимум № 6; аналогичное поведение звезды и в минимуме № 1. В них звезда имеет избыток ультрафиолетового излучения в состоянии пониженного блеска по отношению к более яркому уровню, то есть звезда «голубеет». Для $(B-V)$ этот эффект выражен слабее и уже совсем не заметен для диаграмм $V-(V-R)$.

Минимум № 4, по-видимому, представляет собой промежуточный случай. Аналогично ведет себя звезда и в минимуме № 2, который на рис. 2 не показан.

3. *Спектральные наблюдения.* Спектральные наблюдения WW Vul проводились на 2-м телескопе Шемахинской астрофизической обсерватории в сентябре—октябре 1981 г. в фокусе Кассегрена, с помощью призменного спектрографа с обратной дисперсией 94 А/мм у H_7 .

Всего получено 18 спектрограмм WW Vul в фотографической области. Все спектры WW Vul и стандартной звезды, спектрального класса B9 [8], для каждой ночи фотографировались на одной и той же пластинке (Kodak 103a0) и обрабатывались в стандартных условиях. Полученные спектрограммы записаны в почернениях на саморегистрирующем микрофотометре «Лирефо» фирмы Карл Цейс с увеличением в 37.5 раза. Данные наблюдений приведены в табл. 1.

Из всего наблюдательного материала выбраны спектры, полученные на разных уровнях блеска: в ослабленном состоянии звезды 5.09.81 г. и 6.09.81 г. ($V = 11^m.4$), на восходящей ветви 23.09.81 г. ($V \approx 10^m.8$) и вблизи максимального блеска 29.09.81 г. ($V = 10^m.5$). По этим спектрам построены контуры водородных линий H_3 , H_7 , H_8 и линии К Ca II (рис. 3). На рисунке контуры линий приведены в долях интенсивности непрерывного спектра. Для сравнения в правой части рисунка представлены также контуры линий нормальной звезды спектрального класса A3V.

Общим свойством исследуемых линий является то, что контуры в минимуме блеска в среднем неплохо согласуются с контуром нормальной звезды A3V, хотя от спектра к спектру в течение ночи были замечены изменения. Эти изменения иллюстрируют контуры линий водорода на рис. 3, зарегистрированные 5.09.81 г. Быстрой переменности линий при повышенной яркости звезды совершенно не заметно, поэтому все остальные контуры показаны усредненными. Разберем в отдельности поведение каждой из рассматриваемых линий.

H_8 . В минимуме блеска 5.09.81 г. за один час, при неизменной глубине линии, эквивалентная ширина ее возросла от 7 А до 12 А (ошибка $\sigma \approx 2$ А). Эквивалентные ширины линий водорода и кальция представлены в табл. 2. На спектрах 23.09.81 г. и 29.09.81 г., полученных при подъеме блеска и в максимуме, контур линии H_8 заметно уже, чем в минимуме, а интенсивность меньше, чем у нормальной звезды A3V.

H_7 . При подъеме блеска и в максимуме линия заметно углубляется и очень сильно сужается. Среднее значение эквивалентной ширины в минимуме блеска $W_{cp} = 15$ А, а при подъеме блеска $W_{cp} = 10$ А. Соответ-

ственно уменьшилось и значение средней полуширины линии с 19 Å до 13 Å при ошибке измерения $\sigma \approx 1 \text{ Å}$.

Таблица 1

№ спектра	Дата	JD 2444...	Время экспозиции	UT (середина)
1	5.09.81	853	60 ^m	16 ^h 64 ^m
2	Std		20	17 49
3			60	18 43
4	6.09.81	854	30	16 21
5	Std		10	16 49
6			30	17 18
7	16.09.81	865	45	21 05
8	Std		20	21 50
9	23.09.81	871	30	16 42
10	Std		15	17 15
11			30	17 42
12			30	18 23
13			30	18 55
14	24.09.81	872	30	16 15
15	Std		15	16 47
16			60	17 45
17			20	18 20
18			40	18 55
19	28.09.81	876	15	15 53
20	Std		7	16 14
21	29.09.81	877	15	16 12
22	Std		8	16 31
23			20	16 55
24	13.10.81	891	15	15 32
25	Std		7	15 54
26			15	16 12

H_{β} . На восходящей ветви и в максимуме блеска WW Vul глубина линии значительно больше, чем у стандартной звезды. Полуширина также сильно уменьшается от 15 Å в минимуме до 10 Å ($\sigma \approx 1 \text{ Å}$) при повышении яркости до 10^{m5} в V. В минимуме блеска наблюдалась значительная переменность H_{β} . Так, на спектре № 2 5.09.81 г. интенсивность линии заметно уменьшилась и стала даже слабее H_{β} стандартной звезды A3V.

Таблица 2

Д а т а	№ спектра	$W_{H\beta}$ (А)	$W_{H\gamma}$ (А)	$W_{H\delta}$ (А)	$W_{KCa II}$ (А)
5.09.81	1	7.0	17.0	13.5	2.1
	2	12.0	14.0	10.5	1.6
6.09.81	1	9.0	14.0	10.4	1.6
	2	9.0	15.0	13.7	2.4
23.09.81	1	6.2	10.2	13.8	2.3
	2	6.2	9.0	11.4	3.0
	3	6.8	11.2	10.0	2.0
	4	6.1	10.0	9.5	1.9
29.09.81	1	9.9	13.0	11.5	1.5
	2	7.0	14.0	13.8	1.4

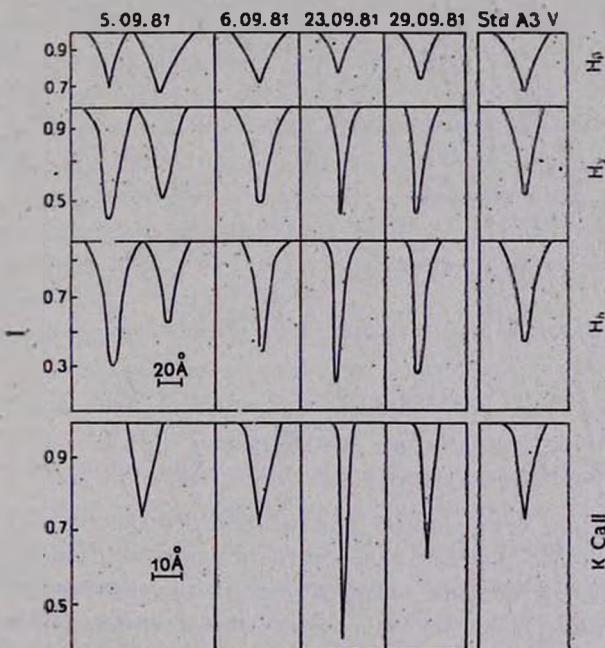


Рис. 3. Контуры линий водорода $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$ и ионизованного кальция $K Ca II$ на разных уровнях блеска.

K Ca II. Очень интересно поведение линии ионизованного кальция $K Ca II$. В минимуме блеска звезды она точно повторяет ход изменения $H\delta$. Существенные изменения ее произошли при подъеме блеска. Она, как $H\gamma$ и $H\delta$, значительно сузилась и сильно углубилась, при этом ее средняя

полуширина уменьшилась с 6.8 А до 3.5 А. В максимальном блеске линия остается такой же узкой, но глубина ее значительно уменьшилась по сравнению со спектрами при подъеме блеска.

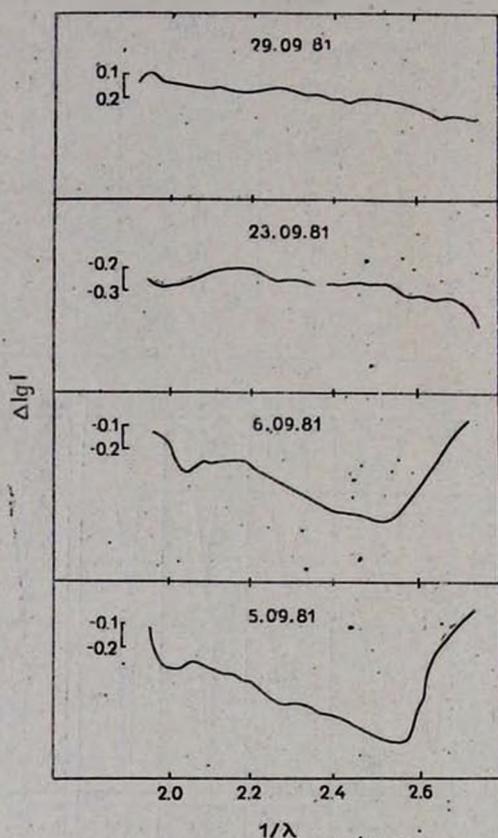


Рис. 4. Относительное распределение энергии WW Vul на разных уровнях блеска.

Рассмотрим усредненные кривые относительного распределения энергии, построенные по спектрам, соответствующим разным уровням блеска (рис. 4). На оси абсцисс отложены обратные значения длин волн $1/\lambda$, на оси ординат $\Delta \lg I$, значения которых определены с помощью выражения

$$\Delta \lg I_{\lambda} = \lg I_{\lambda}(\text{WW Vul}) - \lg I_{\lambda}(\text{std}). \quad (1)$$

Как видно из рис. 4, кривые, полученные для спектров в минимуме яркости, резко отличаются от кривых распределения энергии при подъеме блеска и в максимуме. Ввиду того, что стандартная звезда спектрального класса B9, т. е. горячее, чем WW Vul, на всех кривых виден наклон вправо-вниз, однако в минимуме он более крутой, чем при подъеме блеска и в максимуме. В то же время на кривых в минимуме блеска, начиная с

λ . 4000 А (или $1/\lambda = 2.5$), хорошо заметен подъем кривой в коротковолновой области. Такой подъем отсутствует на кривых распределения энергии на восходящей ветви и в максимуме блеска звезды.

В интервале длин волн λ . 4000 А — 4500 А подсчитана спектрофотометрическая температура WW Vul. Для стандартной звезды температура бралась равной $T_{std} = 15\,000^\circ$ [15]. Оценка температуры приводит к следующим результатам. Если в максимуме блеска $T_c \approx 14\,000^\circ$, что вполне соответствует спектрофотометрической температуре звезды спектрального класса А0—А3, то в минимуме, когда звезда была слабее на 1^m , температура также значительно ниже, $T_c \approx 8000^\circ$.

4. *Обсуждение.* Наиболее глубокое из зарегистрированных при фотоэлектрических наблюдениях ослабление блеска WW Vul [10] достигало значения $V = 12^m.62$. Если и существуют более глубокие минимумы то, вероятно, они случаются редко. Об этом же свидетельствуют и опубликованные ранее гистограммы [8, 16]. Не исключено, что истинный диапазон изменений блеска звезды порядка $2^m.5$ в V .

В работе [8] по интервалу 1962—71 гг. сделан вывод, что блеск звезды большую часть времени находится вблизи максимального. Ослабления ниже $V = 10^m.8$ редки (5% по гистограмме). Но в течение 4 лет наших наблюдений примерно 50% измерений дали значения ниже этого уровня. Анализ фотографических оценок блеска за 32 года [17] показал, что повышенная активность ($\Delta t \sim 10$ лет) сменяется периодами спокойного состояния продолжительностью 8—10 лет.

По нашим наблюдениям в сезоны повышенной активности локальные увеличения блеска обычно не превосходят уровень $V = 10^m.7$. На кривой блеска, опубликованной Рёссигером и Венцелем [8], видны «срывы» с уровня $V = 10^m.6$ — $10^m.7$ в многократные минимумы (сентябрь 1962 г. и август 1971 г.). Там же видно резкое прекращение активной переменности в начале августа 1967 г. и затем наблюдается спокойное состояние звезды на уровне $V = 10^m.5$. Смена активности по нашим данным в 1979 г. и 1981 г. также сопровождалась резким выходом на уровень $V = 10^m.5$. Можно заподозрить существование уровня неустойчивого состояния $V = 10^m.6$ — $10^m.7$. При яркости выше него звезда испытывает медленные изменения, на которые накладываются небольшие колебания и ослабления блеска (сезон 1980 г. на рис. 1).

Анализируя ход колор-индексов при изменениях блеска, отметим, что общий вид диаграмм $V - (V-R)$ отличается от других. Большой разброс точек и плавный изгиб зависимости $(V-R)$ от V (рис. 2) при $V = 10^m.3$ — $10^m.8$ наводит на мысль, что малоамплитудная переменность в R имеет несколько отличный характер от переменности в U и B .

В литературе [16, 18] сообщалось о сложной, двузначной связи между блеском и цветом ряда звезд, например, RY Tau, SU Aur, WW Vul, VX Cas, RZ Psc. В JD 2444853.2444854 WW Vul имела пониженную яркость, $V = 11^m 23, 11^m 44$. Этот уровень соответствует излому на диаграммах величина — цвет (рис. 2). Полученное распределение энергии в спектре звезды в эти даты (рис. 4) показывает значительный УФ-избыток, отсутствующий при повышенной яркости звезды. Сопоставление спектральных и фотоэлектрических данных свидетельствует, что резкое изменение характера зависимости на диаграммах $V-(U-B)$ и $V-(B-V)$ обусловлено именно УФ-избытком.

Сложная картина изменений водородных линий и линии K Ca II (рис. 3) свидетельствует о неоднородности физических процессов, ответственных за характер спектральной переменности.

Известно, что у большинства неправильных переменных с неперiodическими ослаблениями блеска линия H_α в эмиссии [11, 16]. В то же время, как отметил Колотиллов [12], контур H_β WW Vul согласуется с контуром этой линии нормальной звезды A0 V — A3 V, но с красной стороны ее заметна слабая эмиссия с $W_\lambda = 0.5 \text{ \AA}$. Отношение интенсивностей эмиссий $H_\alpha/H_\beta = 50$, откуда толщина оболочки $\tau_0(H_\alpha) > 100$.

В наших наблюдениях, если изменения эквивалентной ширины H_β в минимуме блеска (рис. 3) в какой-то мере можно объяснить вкладом эмиссии, которая временами заметно сужает линию, накладываясь на ее длинноволновую часть — спектр № 1 5.09.81 г., то другие линии водорода (H_γ, H_δ) из-за крутого бальмеровского декремента, вероятно, свободны от заметного влияния эмиссии. На отсутствие синхронности в изменениях разных линий водорода указывалось в работе [19] и для пекулярной звезды SU Aur.

Анализируя рис. 3, можно сказать, что на разных уровнях блеска класс светимости WW Vul различен. Если в минимуме блеска контуры водородных линий и линии ионизованного кальция достаточно хорошо согласуются с контурами линий в спектре звезды нижней светимости (IV—V класс), то в ярком состоянии эта звезда имеет спектр высокой светимости (II—III класс) с очень узкими и глубокими линиями.

Результаты детального исследования всего спектра, в том числе проведения количественной двумерной спектральной классификации предполагается опубликовать в дальнейшем.

В заключение сделаем некоторые выводы:

1. Амплитуда изменения блеска WW Vul $\Delta V = 2^m 5$. Повышенная активность наблюдалась в сезонах 1978, 79, 81 гг. Проявляется она при общем пониженном блеске звезды (ниже уровня $10^m 7$). В эти периоды

наблюдались минимумы различной глубины и продолжительности ($\Delta t = 1^a - 40^d$). Активная фаза обычно заканчивается выходом на уровень 10^{m5} .

Спектры WW Vul на разных уровнях блеска значительно отличаются друг от друга, что ставит под сомнение ранее предложенную гипотезу экранирования пылевыми частицами [8].

2. При глубоких ослаблениях блеска зарегистрировано влияние УФ-избытка на ход зависимостей ($U-B$) и ($B-V$) от V . На спектрах в минимуме блеска УФ-избыток хорошо виден и проявляется в виде резкого подъема кривой относительного распределения энергии, начиная с $\lambda 4000 \text{ \AA}$. При подъеме и в максимуме блеска УФ-избыток не заметен.

3. В минимуме блеска в течение ночи, от спектра к спектру, обнаружена переменность линий водорода за время ~ 1 час, на восходящей ветви и в максимуме блеска переменность не замечена.

4. В минимуме блеска водородные линии и линия K Ca II вполне соответствуют нормальной звезде A3 V, хотя распределение энергии характерно для более позднего класса F0—F2.

5. На восходящей ветви и в максимуме блеска сильно увеличилась глубина линий водорода и K Ca II, в то же время полуширина их заметно уменьшилась. Линии стали намного уже и глубже, чем у звезды A3 V, крылья линий практически не заметны. Очевидно, на разных уровнях блеска светимость звезды различна. В ослабленном состоянии — IV—V класс, в максимуме — II—III.

Авторы благодарят В. И. Кардополова и Э. А. Исмаилова за полезные советы и обсуждение результатов работы.

Шемахинская астрофизическая
обсерватория
Астрономический институт
АН Узб.ССР

PHOTOELECTRIC AND SPECTRAL OBSERVATIONS OF WW Vul

L. V. TIMOSHENKO, G. K. FILIPYEV

The results of the photoelectric UBVR observations of the non-periodic variable star WW Vul obtained during the seasons of 1976—1981 and those of the spectral observations in 1981 with the 2-m Shemakha telescope with the dispersion of 94 $\text{\AA}/\text{mm}$ at H_1 are given. During the observations the star was mostly in the active phase. Light minima of different depth and durations have been revealed. The two-valued light-colour relation has been proved. Spectra have been obtained.

ned at different light levels. Some variations of the hydrogen, K Ca II line intensities and appearance of the ultraviolet excess (which are absent on the ascending arm and in the light maximum) have been found. On different levels of light, luminosity also differed. The hypothesis on dust particle eclipse is questionable.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. H. Herbig, Trans. I.A.U., 8, 806, 1954.
2. L. Ceraski, Astron. Nachr., 288, 320, 1926.
3. Koyama, Kyoto Bull., No. 222, 1931.
4. F. Lauze, Astron. Nachr., 263, 114, 1937.
5. C Hoffmeister, Astron. Nachr., 278, 24, 1949.
6. П. Н. Холопов, Астрон. ж., 36, 295, 1959.
7. L. Melnunger, MVS, 3, 137, 1966.
8. S. Rösstger, W. Wenzel, Astron. Nachr. 294, 29, 1972.
9. I. S. Glass, M. V. Penston. M. N., 167, 37, 1974.
10. Е. А. Кологилев, Г. В. Зайцева, В. И. Шемаврин, Астрофизика, 13, 449, 1977.
11. Г. В. Зайцева, Е. А. Кологилев, Астрофизика, 9, 185, 1973.
12. Е. А. Кологилев, Астрофизика, 13, 33, 1977.
13. Г. В. Зайцева, Кандидатская диссертация, Москва, 1974.
14. В. И. Кардополов, Г. К. Филипьев, ПЗ (в печати).
15. C. W. Allen, Astrophys. Quant., London, 193, 1955.
16. А. Ф. Пузач, Антивспыхивающие звезды, Препринт ИТФ, Киев, 1981.
17. Л. В. Тимошенко, Астрон. цирк., (в печати).
18. Л. В. Тимошенко, Астрофизика, 17, 519, 1981.
19. Л. В. Тимошенко, Цирк. ШАО, 72, 1983.