

УДК 524.335.2

## ПЗС-фотометрия звезд типа RV TAU. III. V VULPECULAE

В.И. Бурнашев<sup>1</sup>, Б.А. Бурнашева<sup>1</sup>, Е.О. Вааген<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИИ Крымская Астрофизическая Обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

<sup>2</sup> Американская ассоциация наблюдений переменных звезд AAVSO, 25 Birth St., Cambridge MA 02137, USA

Поступила в редакцию 27 декабря 2004 г.

### Аннотация.

В течение наблюдательных сезонов 1999, 2000 и 2002 гг. с помощью ПЗС-фотометров выполнены фотометрические наблюдения переменной звезды V Vul.

Анализ этих наблюдений вместе с литературными данными подтвердил среднее значение основного цикла переменности  $P = 76^d 2593$  на протяжении почти 100 лет.

Периодичность изменения длительности основного цикла исследована по совокупности значений  $O - C$ . Характерное время его изменений составляет  $\Pi = 12728^d$

CCD-PHOTOMETRY OF THE RV TAU STARS.III. V VULPECULAE, by V.I. Burnashev, B.A. Burnasheva, E.O. Waagen. The photometric observations of the RV Tau – type star V Vul was carried out in 1999 – 2002. These data and other published results allow to assert the common cycle  $P = 76^d 2593$ . On the base of  $O - C$  diagrams the period of the variations those was determined as  $\Pi = 12728^d$ .

**Ключевые слова:** CCD-photometry, RV Tau stars, V Vulpeculae

---

Переменная V Vul ( $PPM11489 = HD340667 = BD + 26^\circ 3937$ ) – одна из наиболее ярких звезд типа RV Tau. Ее переменность была открыта Виллиамсом в 1904 году, который отнес ее к затменным типа  $\beta$ Луг (Виллиамс, 1904).

Лейнер (1927) получил ряд визуальных оценок блеска и определил, что характер переменности этой звезды напоминает изменения блеска у R Sge, относящейся к классу RV Tau-звезд.

По классификации ОКПЗ фотометрический тип переменности звезды – RVa, т.е. V Vul характеризуется более или менее стабильной кривой блеска, напоминающей кривые затменных типа  $\beta$ Луг. По спектральному типу переменности, введенному Престоном и др. (1963), звезда входит в группу A – т.е. группу звезд спектральных классов G или K, показывающих вблизи главного минимума в визуальной области характеристики звезд типа M (появляются полосы окиси титана TiO), в то же время короче  $\lambda 4500\text{\AA}$  спектр характерен для звезд типа K. Известно, что звезды, отнесенные к этой группе, во всех отношениях менее стабильны, чем звезды, входящие в группу B Престо-на. В частности, у V Vul период заметно меняется, наблюдаются изменения глубины минимумов, перестановки главного и вторичного минимумов и т.д.

На основе инфракрасных наблюдений установлено, что V Vul обладает значительным инфракрасным избытком, обусловленным излучением пылевой оболочки (Ллойд Эванс, 1985; Равендран, 1989). Температура оболочки, примерно 690 K, является наивысшей для звезд этого класса переменности (для сравнения: температура оболочки AC Her составляет 260 K, RV Tau – 460 K).

Звезда имеет пониженное содержание металлов,  $[Fe/H] = -0.30$  (Вальгрэн и др., 1992), и находится сравнительно высоко над галактической плоскостью ( $b = -8^\circ 5$ ). Межзвездное поглощение, соответственно, имеет вполне умеренную величину ( $E_{B-V} = 0^m 31$ ) (Вальгрэн и др., 1992).

## 1 Наблюдения и редукции

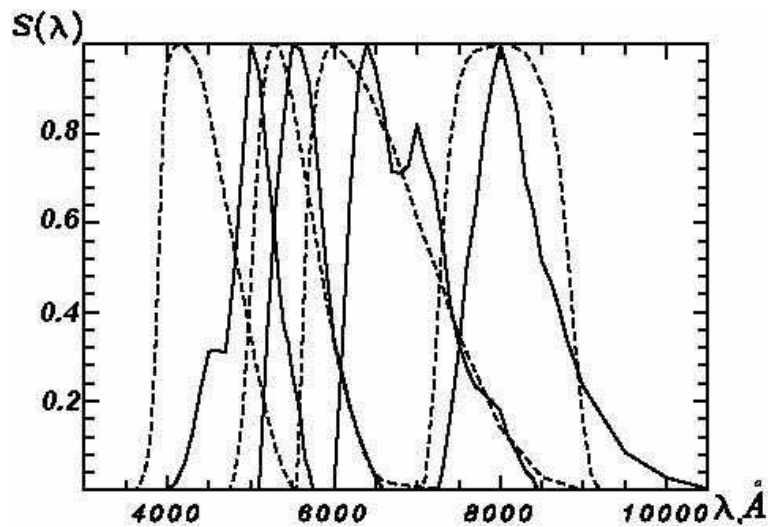
Фотометрические исследования этой переменной имеют богатую историю, резюмированную в таблице 1, где указаны период наблюдений в соответствующей фотометрической системе, число измерений и литературный источник. Более подробно эта таблица будет описана нами далее.

Таблица 1.

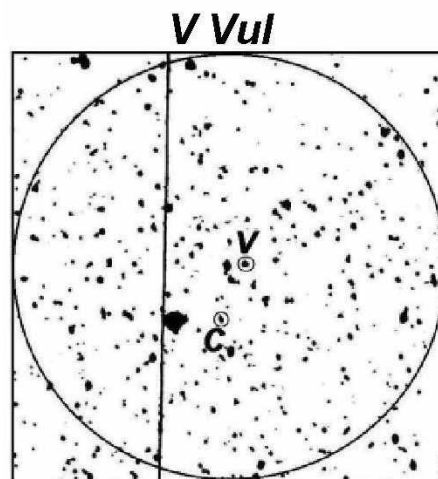
JD 2400000+	Фотометрическая система	Число наблюдений	Автор
14590–29943	$m_{pg}$	1802	Пэйн-Гапошкина и др. 1943
33385.70–33443.77	$m_{pg}$	8	Розино, 1951
14934–15748	$m_{vis}$	13	Виллиамс, 1904
17043.7–27452.6	$m_{vis}$	75	Сирс, 1906
22156.017–24786.82	$m_{vis}$	175	Лейнер, 1927
23545.6–24274.2	$m_{vis}$	216	Анерт, 1930
23640.42–25780.44	$m_{vis}$	465	Бейер, 1931
18234.32–28522.23	$m_{vis}$	605	Ван-дер-Бильт, 1940
25819.31–26234.18	$m_{vis}$	130	Захаров, 1955
18218.6–53137.517	$m_{vis}$	7920	Вааген, 2004
37488.94–37621.67	UBV	20	Престон и др, 1963
40692.86–41253.57	UBVR	30	Дю-Пюи, 1973
42570–42728	BV	5	Доусон, 1979
44495.66–44535.55	UBV	5	Доусон, Паттерсон, 1982
44397.428–44926.107	UBVR	43	Ерлексова и др, 1986
48086.514–48562.269	UBV	27	Зольдос, 1993
51647.70–51744.50	BVR	21	Бурнашев и др.
52418.47–52483.34	BVRI	12	Бурнашев и др.

Период наблюдений переменной V Vul в Крымской обсерватории охватывал три летних сезона: 1999, 2000 и 2002 г. В течение этого времени наблюдательная аппаратура непрерывно менялась и совершенствовалась, в частности, изменился набор светофильтров и фотоприемников. Поэтому во все три сезона инструментальные фотометрические системы были разными. Фотометрические наблюдения в 1999 году и летом 2000 г. в системе, близкой к *BVR* Джонсона, были выполнены в Крымской астрофизической обсерватории с помощью ПЗС-фотометра, установленного на 20-см максутовском телескопе АЗТ-7. (Бурнашев и др., 2002). С осени 2000 г. был применен фотоприемник типа ST-7 и другой набор светофильтров с целью реализации фотометрической системы, близкой к системе *BVR<sub>CIC</sub>* Крона-Казинса. К сожалению, фотометрические полосы *B* и *V* сильно отличались от стандартных (рис. 1). Летом 2002 года проведены наблюдения с третьим ПЗС-фотометром, который был построен на основе матрицы фирмы APOGEE, и установлен в прямом фокусе 70-см телескопа АЗТ-8. Фотометрическая система этого фотометра реализована с помощью комбинации светофильтров. И в этой системе кривые реакции также весьма далеки от стандартных. Коэффициенты связи со стандартной системой для сезона наблюдений 2002 г. определены нами ранее (Бурнашев и др, в печати, 2005 г.)

На рис. 2а показана карта окрестностей переменной V Vul. Карта представляет собой участок небесной сферы размером  $1^\circ \times 1^\circ$ , скопированный из атласа Ференберга (1970). Переменная обозначена значком “*v*”, звезда сравнения, отмеченная на рисунке как “*c*”, применялась многими исследо-



**Рис. 1.** Кривые реакции BVRI – системы. Сплошная линия – для ПЗС – фотометра Крымской Обсерватории в 2000 году. Штриховая линия – для системы Крона – Казинса



**Рис. 2. (а).** Карта окрестности переменной *V Vul*. Диаметр окружности соответствует  $1^\circ$ . Звезда сравнения обозначена как *C*

вателями (Престон и др., 1963; Дю Пюи, 1973; Ерлексова и др., 1986). Более подробно окрестности переменной и звезды сравнения показаны на рис. 2b, который представляет собой рабочий кадр, полученный в системе, близкой к *V*, в одну из наблюдательных ночей в 2002 году. Кадр примерно ориентирован по небесным координатам. Его размер примерно соответствует площадке  $15^\circ \times 15^\circ$  на небесной сфере. Система обозначений, принятая на этой подробной карте, подразумевает, что в ближайшей окрестности переменной для звезд принята однозначная нумерация, которая начинается с самой переменной: NN 1(=*v*), 2, 3 ... и так далее. Для звезд в ближайшей окрестности звезды сравнения приняты двузначные обозначения, также начиная с звезды сравнения: NN 11(=*c*), 12, 13 .... и так далее. На наш взгляд, такая система обозначений позволяет избежать путаницы при наблюдениях переменных звезд. Учет различных инструментальных эффектов и редукция наблюдений к стандартной системе выполнена при помощи пакета стандартных программ IRAF/DAOPHOT(Стетсон,

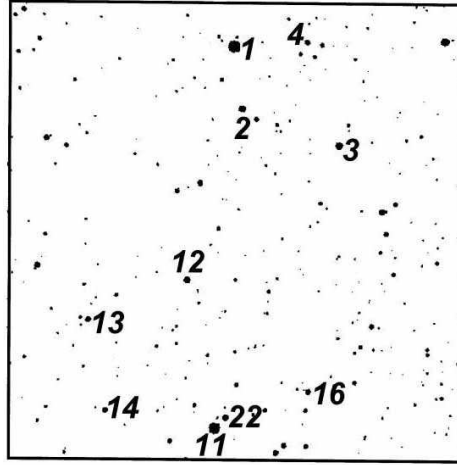


Рис. 2. (b). Более подробная карта окрестности переменной  $V\text{ Vul}$ . Размер квадрата соответствует  $15^\circ \times 15^\circ$

1987). Определение коэффициентов перехода к стандартной системе для наблюдений в 2000 году и другие редукции аналогичны описанным нами ранее (Бурнашев и др., 2002).

Для целей фотометрической привязки были проведены наблюдения стандартных звезд из списка Ландольта (1992) в экваториальной площадке SA 95, а также рассеянного скопления M67, часто применяемого для фотометрических привязок.

Для этого скопления были взяты  $BVI$ -данные Монтгомери и др.(1993), дополненные фотометрией в полосе  $R_c$ , которая была выполнена Шевалье и Иловайски (1991). При этом, для того, чтобы иметь возможность сопоставления наблюдений 2000 года с полученными в течение 1999 и 2002 гг., показатели  $(V - R)_C$  и  $(V - I)_C$  системы Крона-Казинса были преобразованы к джонсоновской системе с помощью уравнений, опубликованных Бесселем (1979):

$$(V - R)_J = 1.37 \cdot (V - R)_C + 0^m041, \quad (1)$$

для  $(V - R)_C < 0^m7$ , а также

$$(V - R)_J = 1.613 \cdot (V - R)_C + 0^m129, \quad (2)$$

для  $0^m7 < (V - R)_C < 1^m6$ .

Показатель

$$(V - I)_J = 1.285 \cdot (V - I)_C \quad (3)$$

в пределах  $0^m < (V - I)_C < 1^m6$ . Редукционные уравнения, учитывающие как разность инструментальной и стандартной фотометрических систем, так и изменение коэффициента атмосферной экстинкции, имеют вид:

$$V = mV - v_1 - v_2 X_v + v_3 (mV - mB) X_v. \quad (4)$$

Для показателей цвета:

$$B - V = (mB - mV) + a_1 + a_2 (X_b + X_v)/2 + a_3 (mB - mV), \quad (5)$$

$$V - R = (mV - mR) + c_1 + c_2 (X_v + X_r)/2 + c_3 (mV - mR), \quad (6)$$

$$V - I = (mV - mI) + d_1 + d_2 (X_v + X_i)/2 + d_3 (mV - mI), \quad (7)$$

где  $mB$ ,  $mV$ ,  $mR$ ,  $mI$  – наблюдаемые величины звезд в соответствующем фильтре,  $X_b$ ,  $X_v$ ,  $X_r$ ,  $X_i$  – средние значения воздушных масс в момент наблюдения.

Все коэффициенты имеют простой физический смысл:

$v_1, a_1, c_1, d_1$  – определяют нуль-пункт системы,

$v_2, a_2, c_2, d_2$  – коэффициенты атмосферной экстинкции,

$v_3, a_3, c_3, d_3$  – включают в себя как цветовые члены атмосферной экстинкции, так и цветовые члены уравнений трансформации. Как показал опыт, при данной точности наблюдений нет смысла в их разделении и уточнении, для наших целей можно взять их постоянными для всего периода наблюдений.

Определенные для одной из ночей (14.11.2000) значения коэффициентов трансформации составляют, соответственно:

$$v_1 = 7.964, v_2 = 0.436, v_3 = -0.250,$$

$$a_1 = -0.286, a_2 = -0.293, a_3 = 0.8,$$

$$c_1 = 0.063, c_2 = -0.110, c_3 = -0.149,$$

$$d_1 = 0.321, d_2 = -0.180, d_3 = -0.035.$$

Очевидно, что, принимая постоянными коэффициенты, определяющие нуль-пункт системы, и пренебрегая изменениями от ночи к ночи в цветовых членах, можно оценить и коэффициенты атмосферной экстинкции  $v_2, a_2, c_2, d_2$ . Определенные таким образом коэффициенты в течение осенне-зимнего периода наблюдений 2000 г. изменялись в следующих пределах:  $v_2$  от 0.38 до 0.60,  $a_2$  от 0.20 до 0.29,  $c_2$  от 0.10 до 0.19,  $d_2$  от 0.18 до 0.22, то есть в среднем их значения были выше, чем соответствующие коэффициенты в 1999 и 2002 гг., когда наблюдения проводились в основном в летнеосенний периоды.

Окончательный результат – значения звездных величин и показателей цвета переменной звезды, определенные по всей совокупности наблюдений, – приведен в таблице 2, где в первой колонке указана дата, во второй – дата юлианского периода, в третьей и последующих, – значения  $V, B - V, V - R, V - I$ , полученные как средние из 2 – 4 независимых оценок в течение данной ночи.

Средний разброс приведенных значений может быть оценен по наблюдениям звезд сравнения, имеющих сравнимую яркость с переменной:

$$\sigma_v \simeq 0^m008,$$

$$\sigma_{bv} \simeq 0^m012,$$

$$\sigma_{vr} \simeq 0^m008,$$

$$\sigma_{vi} \simeq 0^m012,$$

то есть соответствует обычной точности фотоэлектрических оценок блеска.

В поле звезды сравнения, обозначенной как  $c$  на рис. 2 ( $PPM111485 = SAO88893 = HD340686 = BD + 25^\circ 43019.5K0$ ), и, как отмечено выше, применявшейся многими исследователями, попадает еще несколько звезд, для которых на рис. 2b применено обозначение “11(=c), 12, и т.д.”

Полученные результаты фотометрической привязки звезд сравнения по всей совокупности наблюдений, включающих до 18 независимых оценок блеска, приведены в таблице 3. Для показателей  $(V - R)_C$  и  $(V - I)_C$  в системе Крона-Казинса, полученных в 2000 г., имелось по 4 – 5 оценок. Мы сочли необходимым в таблице 3 выделить их отдельно. Указана также погрешность полученного результата. Расхождения в имеющихся независимых определениях звездной величины и цвета для звезды сравнения показывают разброс, сравнимый с точностью наших измерений:

$$V = 8^m580, B - V = 1^m060 \text{ (Престон и др., 1963),}$$

$$V = 8^m60, B - V = 1^m06, V - R = 0^m75 \text{ (Дю Пюи, 1973).}$$

Отметим попутно, что колебания блеска и цвета для некоторых звезд, замеченные по индивидуальным измерениям, хотя и не показывают определенной периодичности в силу скудости измерений, тем не менее, дают основание заподозрить переменность в пределах нескольких сотых звездной величины для нескольких звезд. Возможными переменными могут быть следующие звезды: N 2 в поле переменной и N 12 в поле звезды сравнения (рис. 2b).

Сводная фазовая кривая блеска для V Vul, построенная для среднего значения периода  $P = 76^d2593$  приведена на рис. 3. Сплошной линией указаны средние фазовые кривые, построенные Ерлексовой и др. (1986). Значками в виде цифр указаны индивидуальные наблюдения, полученные

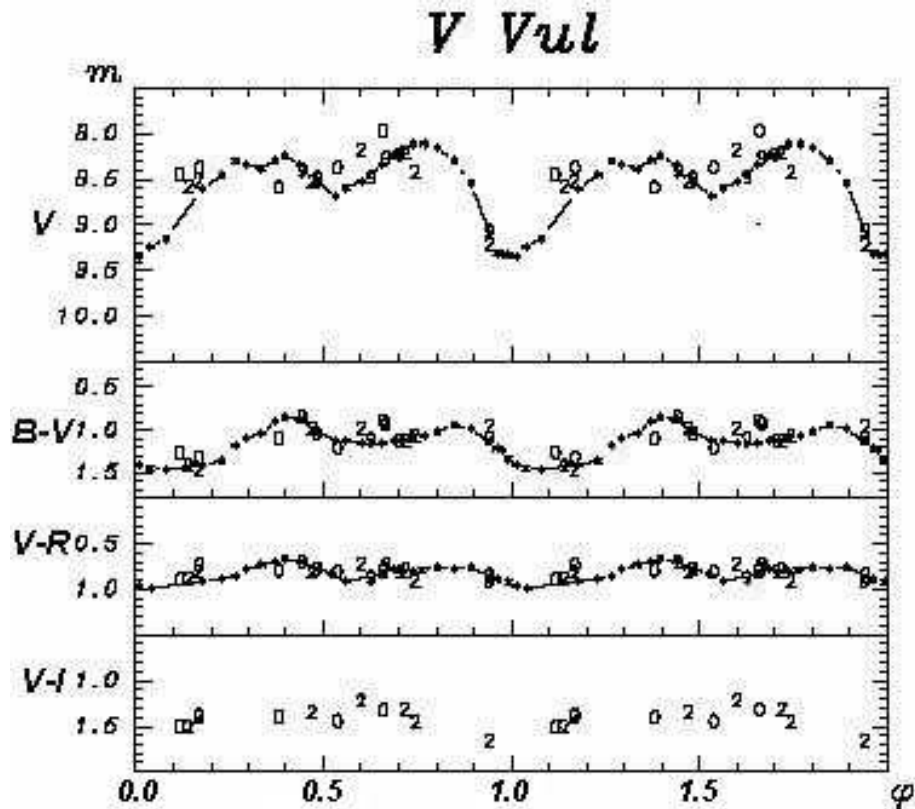


Рис. 3. Сводная кривая блеска *V Vul*. Сплошной линией отмечены средние кривые по данным Ерлексовой и др. (1986). Цифрами обозначены крымские наблюдения 1999 – 2002 года

в 1999, 2000 и 2002 годах. При вычислении фазы учитывалось изменение начальной эпохи, вычислявшейся по формуле (9), приведенной ниже. Средняя ошибка каждого наблюдения сравнима с размером значка. Как видно, разброс значений  $V$ ,  $B-V$ ,  $V-R$ ,  $V-I$ , особенно в главном минимуме, вполне реален и вызван переменностью звезды в течение основного периода  $76^{\text{d}}.2593$ .

## 2 Анализ результатов

История фотометрических наблюдений *V Vul*, суммирована в таблице 1. Как видно, большая часть почти столетнего ряда, начинающегося с октября 1899 г., и перекрывающего почти полтысячи периодов изменений блеска, получена по визуальным и фотографическим оценкам. Точные фотоэлектрические наблюдения еще довольно скудны и разрозненны и недостаточно плотны для того, чтобы можно было сделать определенные выводы о кратковременной переменности внутри основного 76-дневного периода. Среднее значение этого периода, равное  $76^{\text{d}}.2593$ , оценено нами по всей совокупности фотографических, визуальных и фотоэлектрических оценок. В первом столбце таблицы 1 отмечен период наблюдений, во 2-м – фотометрическая система, в 3-м – число оценок блеска переменной в соответствующей системе. При этом указаны только результаты наблюдений, которые были применены для дальнейшего анализа. Сомнительные наблюдения (отмеченные самими авторами, как неуверенные) были отброшены. В последнем столбце дана соответствующая литературная ссылка.

Ряд визуальных оценок блеска, начиная с момента открытия переменности звезды в 1899 г. до осени 2002 г., в основном базируется на данных AAVSO (Вааген, 2004), который дополнен, кроме

Таблица 2.

Data	JD2450000+	V	B - V	V - R	V - I	n
17/06/1999	1347.47	9.071	1.101	0.911	-	3
05/07/1999	1365.45	8.234	1.130	0.824	-	3
08/07/1999	1368.35	8.267	0.940	0.738	-	3
11/07/1999	1371.40	8.494	1.124	0.877	-	3
22/07/1999	1382.36	8.486	1.050	0.784	-	3
25/07/1999	1385.38	8.412	0.848	0.714	-	3
17/10/2000	1835.21	8.376	1.224	0.816	1.447	3
29/10/2000	1847.17	8.599	1.105	0.795	1.415	4
14/11/2000	1863.20	8.380	1.334	0.742	1.388	3
18/11/2000	1867.21	8.454	1.269	0.896	1.521	3
23/12/2000	1902.15	7.976	0.903	0.797	1.327	3
29/05/2002	2424.49	9.232	0.973	0.849	1.667	3
13/06/2002	2439.48	8.425	1.073	0.909	1.455	3
15/06/2002	2441.45	8.211	1.130	0.800	1.324	3
24/06/2002	2450.43	8.176	0.979	0.730	1.231	3
04/07/2002	2460.46	8.534	0.991	0.824	1.358	3
27/07/2002	2483.43	8.522	1.481	0.820	1.402	3
29/07/2002	2485.44	8.582	1.434	0.888	1.522	3

Таблица 3.

Звезды в поле	Phot. System	V	B - V	V - R	V - I
2	J	10.863 ±0.010(18)	0.477 ±0.022 (18)	0.408 ±0.012(13)	0.694 ±0.018 (7)
	C			0.288 ±0.016(5)	0.619 ±0.018(5)
3	J	10.634 ±0.016 (18)	1.534 ±0.040 (18)	1.227 ±0.014 (13)	2.089 ±0.018 (7)
	C			0.838 ±0.033 (5)	1.688 ±0.037 (5)
4	J	12.190 ±0.009(18)	1.123 ±0.022 (18)	0.834 ±0.027 (13)	1.452 ±0.023 (7)
	C			0.580 ±0.013 (5)	1.188 ±0.022 (5)
11	J	8.599 ±0.006 (18)	1.060 ±0.001 (18)	0.750 ±0.006 (12)	1.251 ±0.003 (7)
	C			0.520 ±0.002 (5)	1.064 ±0.005(5)
12	J	11.244 ±0.039 (14)	0.251 ±0.013 (13)	0.234 ±0.015 (13)	0.362 ±0.030 (8)
13	J	12.207 ±0.008 (17)	0.554 ±0.020 (17)	0.460 ±0.007 (12)	0.768 ±0.010(6)
	C			0.323 ±0.009 (4)	0.691 ±0.012 (4)
14	J	12.218 ±0.009 (17)	0.428 ±0.011 (17)	0.394 ±0.009 (17)	0.624 ±0.008 (6)
	C			0.250 ±0.003 (5)	0.573 ±0.004 (5)
16	J	12.148 ±0.006 (18)	1.032 ±0.010 (18)	0.751 ±0.008 (12)	1.286 ±0.008 (6)
	C			0.518 ±0.004 (5)	1.075 ±0.008 (5)
22	J	11.521 ±0.008 (12)	0.321 ±0.010 (12)	0.271 ±0.006 (7)	0.444 ±0.004 (6)
	C			0.162 ±0.007 (5)	0.434 ±0.008 (5)

указанных в таблице оценок Виллиамса и Лейнера, преобразованных из степенной шкалы в шкалу звездных величин, также и фотоэлектрическими наблюдениями нескольких авторов.

В фотографической области наиболее обширный ряд оценок блеска V Vul получен Пэйн – Гапошкиной и др. (1943) по снимкам Гарвардской коллекции.

Считая, что гарвардская фотографическая система не слишком отличается от фотоэлектрической системы В и добавив к нашим наблюдениям также фотометрию других авторов, приведенную в таблице 1, мы получили довольно обширный ряд, перекрывающий почти 504 периодов изменения блеска звезды, правда, с большими пробелами.

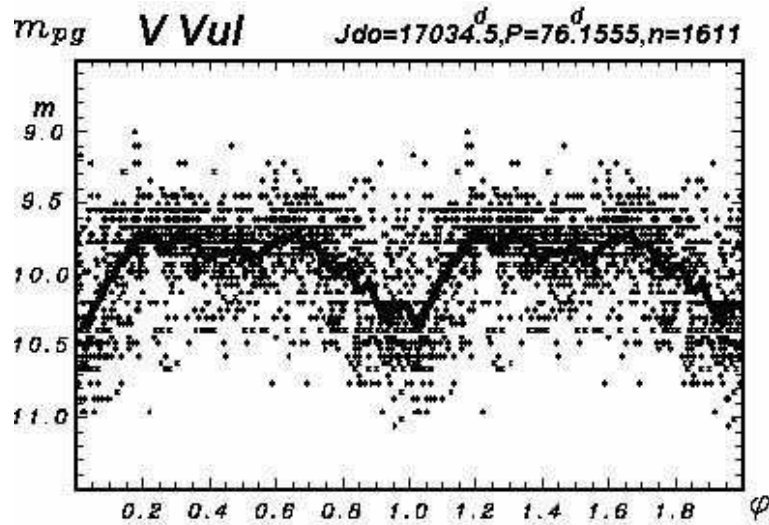


Рис. 4. Сводная фазовая кривая для фотографических наблюдений на интервале Jd 2417034 – 2429943 (1905 – 1940 гг.)

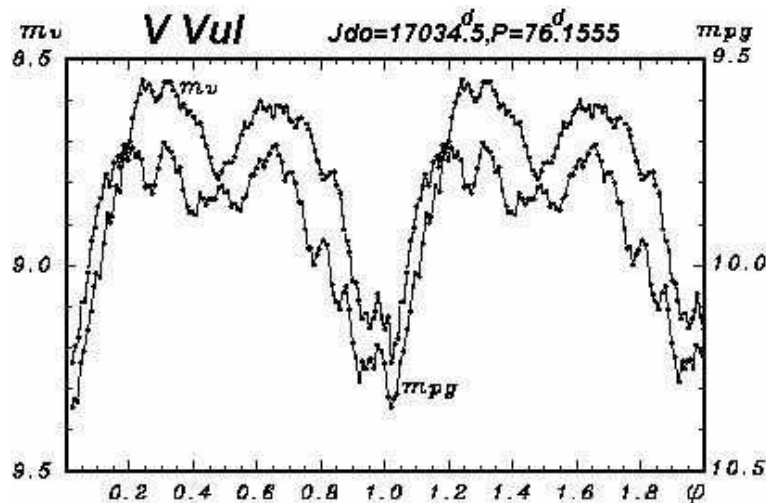


Рис. 5. Средние фазовые кривые визуальных ( $n=2108$ ) и фотографических ( $n=1611$ ) наблюдений за период с 1905 по 1940 гг.

Оказалось, что оба ряда наблюдений, фотографических и визуальных, довольно плотно заполняют временной интервал с 1905 г. по 1940 г. Таким образом, можно считать, что для этого интервала мы имеем два плотных и независимых ряда оценок блеска.

Оба ряда были проанализированы с помощью пакета программ Пельта (1992). При этом визуальные и фотографические наблюдения анализировались отдельно. Это дало дополнительный независимый контроль достоверности получаемых результатов. Наиболее выдающийся пик на периодограммах соответствует периоду  $P = 76^{\text{d}}1555$ , то есть отличный от среднего за более длительный интервал значения  $P = 76^{\text{d}}2593$ . В качестве примера для этого периода на рисунке 4 показана фазовая кривая для фотографических наблюдений. Значения фазы переменности  $\varphi$  вычислены по формуле:



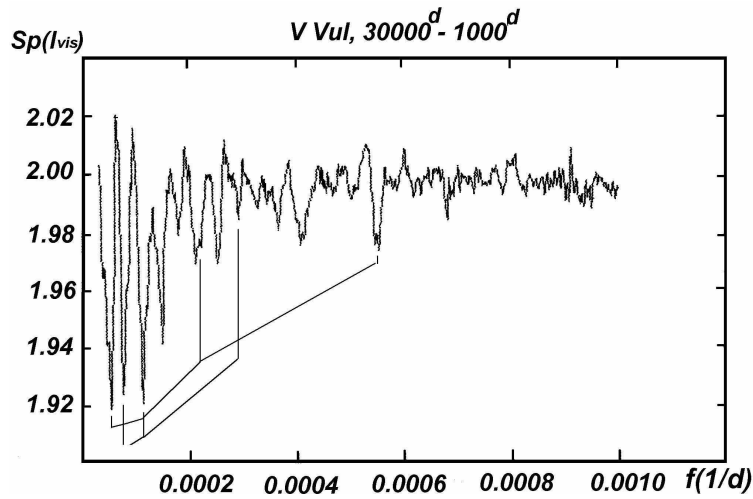
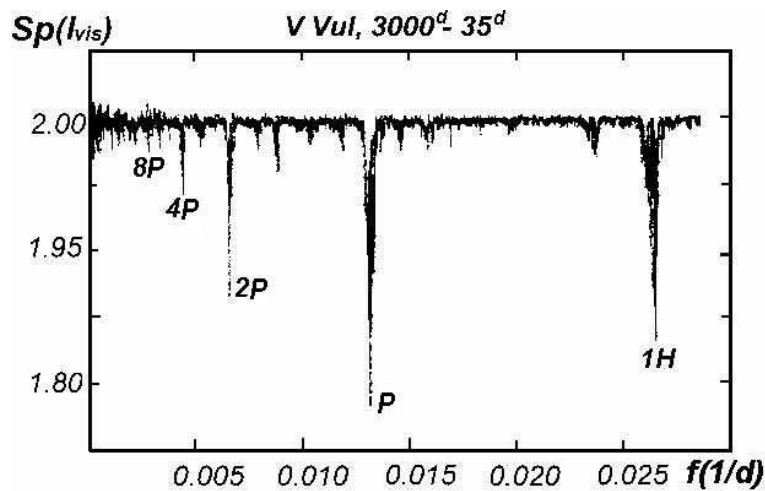
Рис. 6. (а). Низкочастотная часть периодограммы, построенной по визуальным наблюдениям  $V Vul$ 

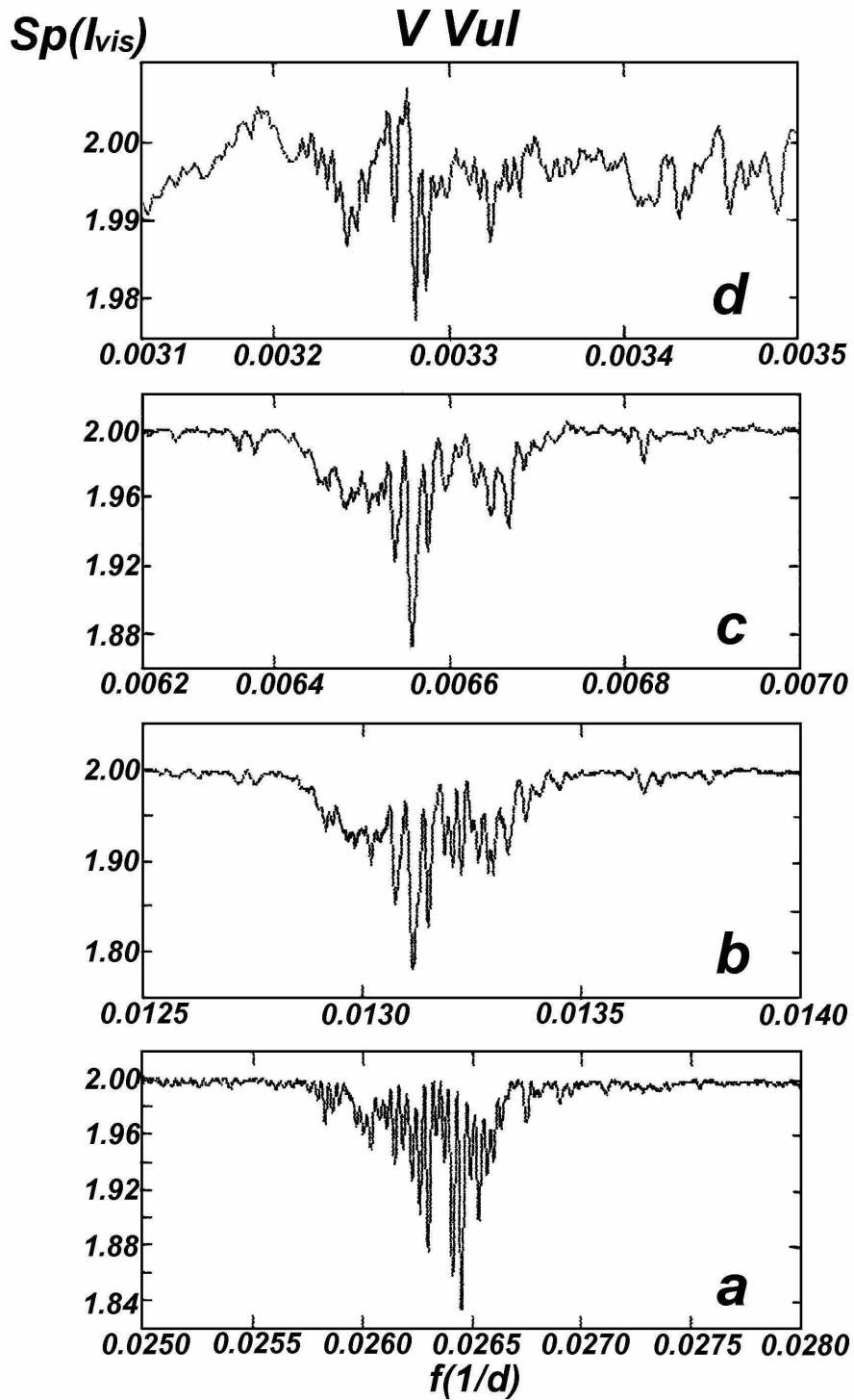
Рис. 6. (б). Высокочастотная часть периодограммы

$$MinI = JD2417034.5 + 75.1555 \cdot E.$$

Обращает на себя внимание довольно большой разброс, особенно значительный в главном минимуме. Визуальные наблюдения показывают примерно такую же картину. На рисунке 5 показаны средние кривые изменения блеска  $V Vul$  по визуальным и фотографическим оценкам. Каждая точка соответствует среднему значению на интервалах фазы  $\Delta\varphi=0.04$ . Указано общее число оценок, принятых при осреднении. Отчетливо видны мелкие детали, повторяющиеся на обеих кривых. Отметим еще раз, что оба ряда наблюдений, фотографических и визуальных, можно рассматривать независимо, поэтому эти детали вполне реальны.

Известно, что для звезд типа RV Тау моменты минимумов, определенные по визуальным и фотографическим наблюдениям, не совпадают. По 145 близким наблюдаемым моментам минимумов для обоих рядов в интервале с 1905 по 1940 гг нами определено среднее запаздывание визуальных минимумов относительно фотографических, составляющее  $3^{\circ}5$ .

Ряд визуальных оценок блеска переменной, хотя и имеет довольно продолжительные пробелы, более чем в два раза по длительности превышает ряд фотографических оценок. После некоторых



**Рис. 7.** Более подробное строение некоторых пиков высокочастотной периодограммы: а) для первого обертона (1H), б) для фундаментальной моды (F), с) для удвоенного фундаментального периода (2F), d) для периода (4F)

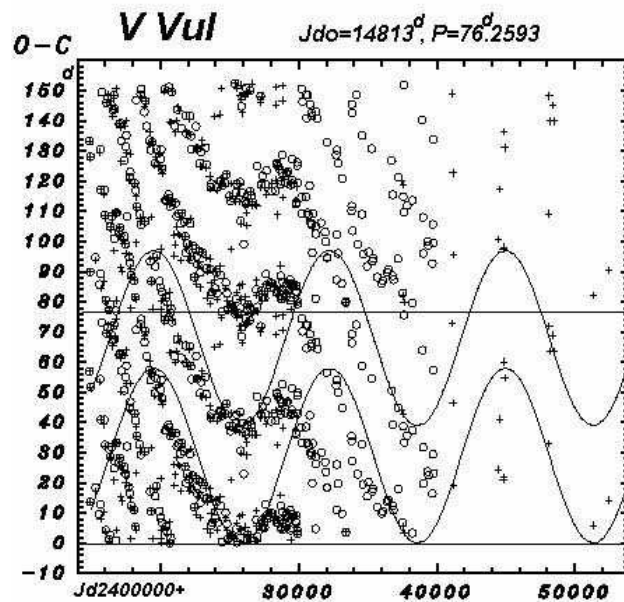


Рис. 8. Диаграмма О – С для минимумов блеска по фотографическим наблюдениям для периода  $76^d.2593$ . Сплошной линией указано синусоидальное колебание с периодом  $12828^d$ .

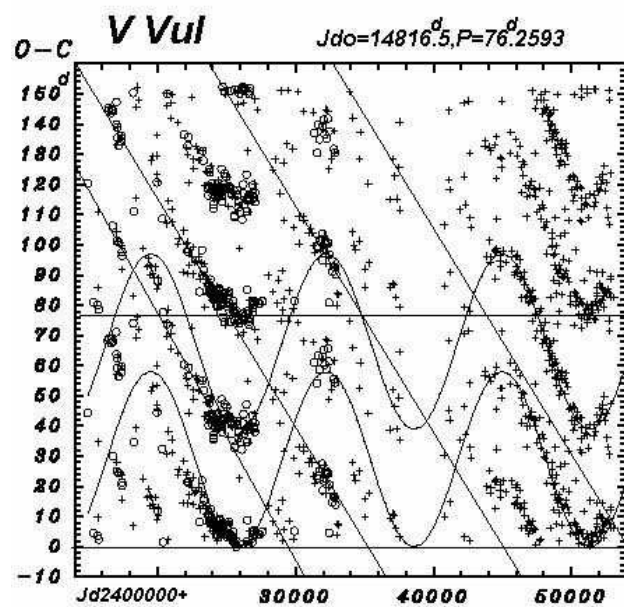


Рис. 9. Диаграмма О – С для минимумов блеска по визуальным наблюдениям

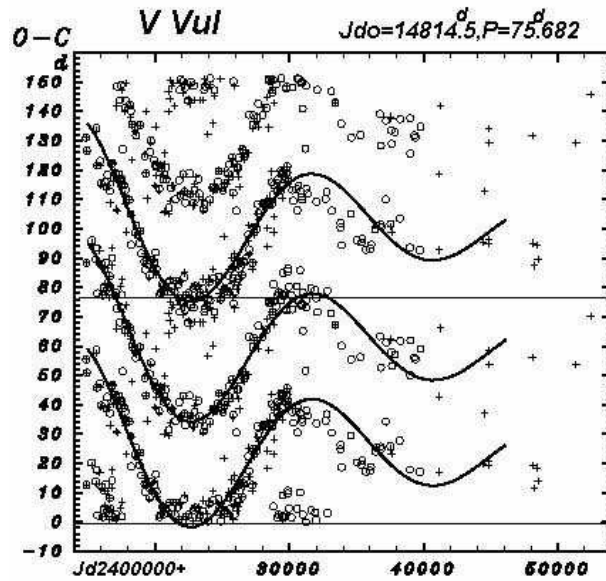


Рис. 10. Диаграмма О – С для фотографических минимумов для периода 75<sup>d</sup>682

манипуляций, связанных с подгонкой длины ряда для счета по программе Пельта (1992), для него также были построены графики спектра мощности. При этом мы сочли более правильным в дальнейшей обработке иметь дело не со звездными величинами, а с изменениями блеска, выраженными в интенсивностях, отнесенными к некоторой средней величине, соответствующей среднему блеску  $m_{vis} = 8^m9$ :

$$I_{vis} = 10^{\frac{(8.9 - m_{vis})}{2.5}} \quad (8)$$

Полученные спектры мощности для интенсивности излучения звезды в визуальной области показаны на рис. 6а,б.

Полная длительность временного интервала для визуальных наблюдений примерно равна 38 тыс. дням. Для области спектра низких частот, показанной на рисунке 6а, минимальная еще различимая частота соответствует периоду около 19 тыс. дней. В этой области характерны следующие особенности: раздвоенность пиков и быстрое падение амплитуды. Возможно, что эта “раздвоенность” вызвана амплитудной модуляцией средней частоты (соответствующей периоду около 15 тыс. дней) более низкой частотой (период которой около 85 тыс. дней). Такое явление хорошо известно в радиотехнике. Не исключено также, что наблюдаемый эффект является следствием прогрессивного изменения периода. В более высокочастотной области максимальный пик соответствует основному периоду изменения блеска.

Среднее значение этого периода по всей совокупности визуальных оценок блеска почти за сто лет получилось равным 76<sup>d</sup>2593, т.е. отличается от значения 76<sup>d</sup>1555, полученного по независимым оценкам за 1905 – 1940 гг.

На рисунке 6б хорошо видны пики, соответствующие последовательному удвоению основного периода, – так называемая последовательность Фейгенбаума. Кроме того, видны пики, кратные нечетным числам периода. Известно, что подобное поведение спектра мощности характерно для переходных процессов от периодического изменения к хаотическому. Хорошо видно, что максимальный вклад в излучение дают основная частота ( $F$ ) и ее первый обертон ( $1H$ ), что соответствует распространенной модели взаимодействия этих двух мод колебаний для звезд такого типа переменности (Тачманн и др., 1993; Фокин, 1994).

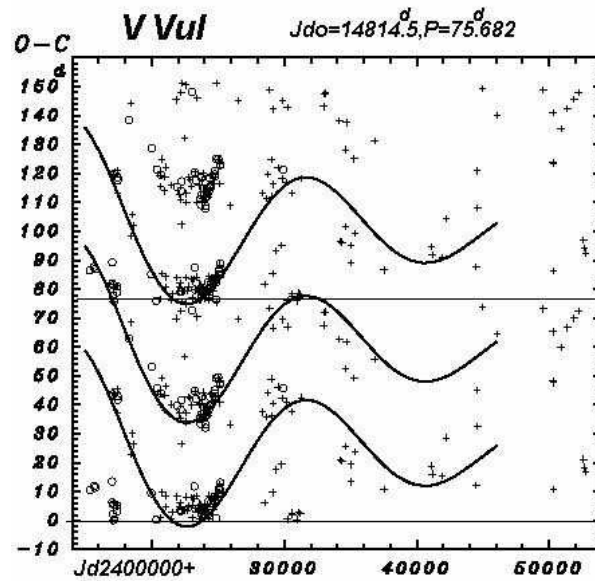


Рис. 11. (а). Диаграмма  $O - C$  для визуальных минимумов, соответствующих колебанию с периодом  $75^d.682$

Структура пиков показывает сложный и запутанный характер. Эта последовательность, показанная более подробно на рисунке 7, до некоторой степени иллюстрирует их подобие, в то время как даже внешне пик, соответствующий первому обертону (периоду около 36 дней), заметно отличается. На всех рисунках наиболее заметной особенностью является раздвоение пиков и довольно широкие спутники с обеих сторон. Известно, что подобное поведение спектра мощности может свидетельствовать, с одной стороны, о наличии близких периодов и биениях, с другой стороны, о прогрессивном изменении периода.

Для того, чтобы как-то сделать выбор между этими возможностями, нами были построены диаграммы  $O - C$  – наблюдаемого минус предвычисленного моментов обоих минимумов, главного и вторичного, – для среднего периода  $76^d.2593$ . В основном использовались сводки Ждановой (1956), Ерлексовой (1971), Бейера (1931), Яккия (1931). Кроме того, для построения этих графиков по всей совокупности имевшихся в нашем распоряжении фотометрических данных для фотографической и визуальной областей были независимо переопределены моменты всех минимумов на кривых блеска. Оцененные по всей совокупности наблюдений отклонения моментов главного и вторичного минимумов также были проанализированы нами с помощью пакета Пельта. На рисунках 8 и 9 показан ход значений  $O - C$  со временем для обоих минимумов. В отличие от общепринятого способа представления подобных графиков, для большей наглядности, подобно фазовым кривым на рис. 3 – 7, мы продолжаем их на этот раз вдоль оси ординат, как бы “удваивая” число точек. То есть фактически мы считаем при этом, что каждое значение  $O - C$  относится не только к данному периоду, но и к предыдущему.

Кружками на рисунках обозначены литературные данные, кресты – определенные нами по визуальным и фотоэлектрическим  $V$ -кривым блеска, а также по фотографическим и  $B$ -наблюдениям. Поскольку использован один и тот же наблюдательный материал, отклонения крестов от кружков, вообще говоря, характеризует точность определения моментов минимумов разными авторами. Как видно, определенная часть наблюдений может представлять собой циклические отклонения моментов главного и вторичного минимумов, приблизительно представляемых синусоидами, нанесенными на графиках сплошными линиями:

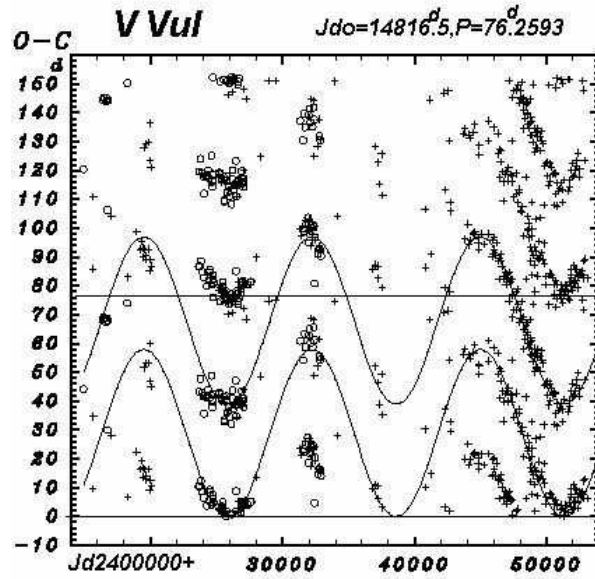


Рис. 11. (b). Диаграмма О – С для визуальных минимумов, соответствующих колебаниям с периодом  $76^d.2593$

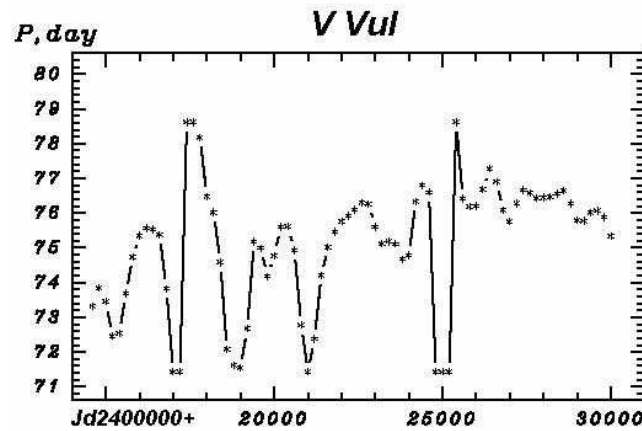


Рис. 12. (a). Изменение основного периода блеска по фотографическим наблюдениям в интервале JD 2414934–2429943

$$s = 29^d \left\{ \sin \left[ \frac{2\pi}{12728} \cdot (t - 2414448.5) \right] \right\} + 29^d, \quad (9)$$

$$s = 29^d \left\{ \sin \left[ \frac{2\pi}{12828} \cdot (t - 2414448.5) \right] \right\} + 68^d. \quad (10)$$

Возможно, что явление перемены местами главного и вторичного минимума, отмеченное многими наблюдателями, по крайней мере, частично, может быть обусловлено их периодическим сдвигом

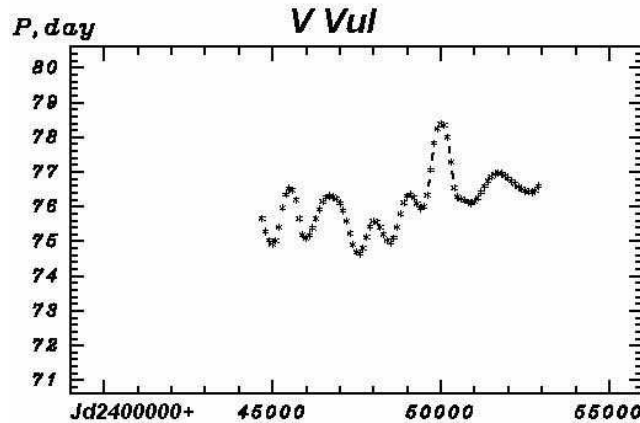


Рис. 12. (b).Изменение основного периода блеска по визуальным наблюдениям в интервале JD 2447748–2452883

с периодом около 12 тыс. дней в течение основного 76-дневного цикла изменений блеска. Во-вторых, другая часть точек лежит на прямых, наклон которых, как известно, характеризует отклонение продолжительности цикла от принятого при расчете. То есть, эти минимумы могут являться указанием на дополнительные колебания с близкой частотой (около  $P = 75^{\circ}682$ ), вызывающие биения с периодичностью около 10.3 тыс дней. Можно предположить, что “исчезновение” периодических изменений блеска, которые наблюдаются в определенные эпохи, например, около JD 2421000, 2425700, 2442800, 2450000, 2451000, вызваны именно этой причиной. Возможно, что наклон этот слабо изменяется также циклически, то есть период этих близких колебаний также меняется. Моменты минимумов этих вторичных колебаний как бы “мигрируют” в течение принятого периода, соответствующего наибольшему пику на периодограмме. Таким образом, часть деталей, о которых шла речь при обсуждении рисунка 5, может быть объяснена существованием колебаний с периодом, близким к основному.

Диаграммы  $O - C$ , построенные для этого вторичного периода  $P = 75^{\text{d}}682$  показаны на рисунках 10 и 11а. Для фотографических наблюдений большинство точек более или менее близки к плавной кривой, приближенно представляемой затухающей синусоидой с периодом около 18 тыс дней:

$$s = 38^{\text{d}}5 \exp \left\{ \frac{-0.786(t - 14000)}{18000} \right\} \left\{ \sin \left[ \frac{2\pi}{18000} \cdot (t - 2414448.5) \right] \right\} + 24^{\text{d}}0, \quad (11)$$

$$s = 38^{\text{d}}5 \exp \left\{ \frac{-0.786(t - 14000)}{18000} \right\} \left\{ \sin \left[ \frac{2\pi}{18000} \cdot (t - 2414448.5) \right] \right\} + 60^{\text{d}}0. \quad (12)$$

Ряд для значений  $O - C$ , определенных по наблюдениям в визуальной области, мы попытались разделить на значения, удовлетворяющие периоду  $P = 76^{\text{d}}2593$ , и значения  $O - C$  для периода  $75^{\text{d}}682$ . Результат такого разделения показан на рисунках 11а и 11b. То есть, можно предположить, что если в фотографической области спектра превалирует период  $75^{\text{d}}682$ , то в визуальной сосуществуют оба периода.

Программные средства, предоставляемые Американской Ассоциацией наблюдателей переменных звезд, позволяют исследовать изменения периода циклических переменных (Вааген, 2004). В частности, появилась возможность исследовать изменение периодов на основе WWZ-преобразования (вейвлет-Z-преобразования) (Форстер, 1996). При этом исследуемый ряд не должен иметь существенных пробелов. Подходящими для этой цели рядами получились результаты фотографической

фотометрии в интервале JD 2414934 – 2429943 и достаточно плотный ряд визуальных наблюдений в интервале JD 2447748 – 2452883. Так как в данном случае отмеченное выше запаздывание в 3.5 дня не имеет значения, мы сочли правомерным сравнивать оба этих ряда.

Результат применения вейвлет-преобразования к этим рядам показан на рис 12. По сравнению с рисунками 8-11 видны более подробные детали, в частности, примерно циклические изменения основного периода с характерным временем около 1 – 2 тыс. дней. Отметим в этой связи, что заметные особенности около JD 2417000, 2419000, 2421000, 242500, 2450000 отражают как “пробелы” в данных, так и отмеченные выше “замирания” из-за наложения колебаний с близкими частотами. Как видно, кроме полуправильных изменений длительности основного периода в пределах от  $74^d$  до  $79^d$ , в обоих случаях заметны и более длительные изменения, характерное время которых составляет несколько тысяч дней.

### 3 Выводы

Таким образом, в Крымской обсерватории выполнена ПЗС-фотометрия переменной V Vul в полосах *BVRI* на протяжении нескольких циклов переменности с периодом  $P = 76^d 2593$ . Установлена фотометрическая последовательность звезд в окрестности переменной.

Анализ наблюдений вместе с литературными данными позволил установить наличие сложного изменения блеска, обусловленного как последовательным удвоением основного периода, так и возникновением дополнительных нечетных гармоник, свидетельствующих о том, что, повидимому, звезда находится в переходном режиме от периодических колебаний к хаотическим.

Из анализа диаграмм  $O - C$  для главного и вторичного минимума установлено их сложное поведение со временем, возможно, объясняющее некоторые особенности фотометрического поведения переменной.

Авторы глубоко благодарны наблюдателям и составителям базы данных AAVSO за результаты визуальных наблюдений, использованных в данном исследовании. Вейвлет-анализ выполнен с помощью WWZ-программы, разработанной Американской Ассоциацией наблюдателей переменных звезд.

### Литература

- Анерт (Ahner P.) // *Astron. Nachrichten*. 1930. Bd. 237. С. 123.  
 Бейер (Beyer M.) // *Astron. Abhandl.* 1931. V. 8. N. 3. P. 1. V. 101. P. 294.  
 Бессель (Bessel M.S.) // *Publ. A. S. P.* 1979. V. 91. P. 589.  
 Бурнашев В.И., Бурнашева Б.А., Витриченко Э.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обс.* 2002. Т. 98. С. 123.  
 Бурнашев В.И., Бурнашева Б.А., Горыня Н.А., Самусь Н.Н., Сачков М.Е., Вааген Е.О. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обс.* 2005. Т. 101. в печати.  
 Вааген (Waagen E.O.) // *Observations from the AAVSO International Database*. 2004. Private communication.  
 Вальгрен и др. (Wahlgren G.M. et al) // *Astron J.* 1992. V. 104. N. 3. p. 1174.  
 Ван-дер-Бильт (Van der Bilt M.J.) // *J. des Observateurs*. 1940. V. 23. P. 116.  
 Виллиамс (Williams A.S.) // *Astron. Nachrichten*. 1904. V. 164. С. 306.  
 Доусон (Dawson D.W.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1979. V. 41. P. 97.  
 Доусон и Паттерсон (Dawson D.W. Patterson. ) // *Publ. A. S. P.* 1982. V. 94. N. 559. p. 574.  
 ДюПуи (DuPuy D.) // *Astrophys. J.* 1973. V. 185. P. 597.  
 Ерлексова Г.Е., Зубарев А.В., Рахимов Ю.В. и др. // *Переменные звезды*. 1986. Т. 22. N. 3. С. 311.  
 Ерлексова Г.Е. // *Переменные звезды*. 1971. Т. 18. N. 1. С. 53.  
 Жданова И.Г. // *Известия ГАО АН УССР*. 1956. Т. 1. N. 2. С. 69.  
 Захаров (Zaharov G.) // *Переменные звезды*. 1955. Т. 10. С. 79.  
 Зольдос (Zoldos E.) // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 268. N. 1. P. 149.



- Ландольт (Landolt A.U.) // *Astron. J.* 1992. V. 104. P. 340.
- Лейнер (Leiner E.) // *Astron. Nachrichten.* 1927. Bd. 229. S.27.
- Ллойд Эванс (Lloyd Evans T.) // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 1985. V. 217. N. 2. P. 493.
- Монтгомери и др. (Montgomery K.A., Marshall L.A., Janes K.A.) // *Astron. J.* 1993. V. 106. P.181.
- Пельт (Pelt J.) // *Irregularly Spaced Data Analysis ( User Manual).* Helsinki. 1992. P. 267.
- Престон и др. (Preston G.W., Krzeminski W., Smak J., Williams J.A.) // *Astrophys. J.* 1963. V. 137. P. 401.
- Пэйн-Гапошкина Ц. и др. (Payne-Gaposhkin C., Brenton V.K., Gaposhkin S.) // *Harvard Annals.* 1943. V. 113. N. 1. P. 1.
- Равендран (Raveendran A.V.) // *Mon. Not.R. astr. Soc.* 1989. V. 238. N. 3. P. 945.
- Розино (Rosino L.) // *Astrophys. J.* 1951. V. 113. N. 1. P. 60.
- Сирс (Seares F.H.) // *Laws. Bull.* 1906. N. 8. P. 115.
- Стетсон (Stetson P.B. ) // *Publ. A. S. P.* 1987. V. 99. P. 191.
- Тачманн (Tuchmann Y., Lebre A., Mennissier M.O., Yarri A.) // *Astron.Astrophys.* 1993. V. 271. P. 501.
- Ференберг (Verenberg H.) // "Atlas Stellarum 1950.0". 1970. Treugessel-Verlag. Abt. II. D-4000. Dusseldorf 4 Postfach 4065.
- Фокин(Fokin A.B.) // *Astron.Astrophys.* 1994. V. 292. P. 133.
- Форстер (Forster G.) // *Astron.J.*, 1996, V. 112. P. 1709.
- Шевалье (Chevallier C., Ilvaysky S.A.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1991. V. 90. P. 225.