

УДК: 524.33—56—355

О КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИКРОПЕРЕМЕННОСТИ  
V 351 Ori

Г. У. КОВАЛЬЧУК

Поступила 28 ноября 1984

Принята к печати 3 октября 1985

При спектральном анализе длительных рядов наблюдений переменной звезды V 351 Ori в изменениях блеска обнаружена квазипериодическая составляющая с периодом  $P = 326 \pm 4$  секунд. Амплитуда квазипериодических вариаций блеска в ультрафиолетовой области спектра больше (по сравнению с голубой областью спектра) и изменяется от  $0^m.06 (U)$  (при нормальном блеске переменной) до  $0^m.15 (U)$  (при ослаблении яркости переменной на  $1^m.6 (V)$ ).

1. *Введение.* Так как термин «микрорегулярность» не имеет пока четкого определения, в данной работе под ней подразумеваются изменения блеска с амплитудами  $\leq 0^m.1$  и характерными временами порядка  $10^2$ — $10^3$  сек. Нерегулярная микрорегулярность (фотометрическая) известна у некоторых быстрых неправильных переменных звезд [1, 2], в последнее время обнаруживается она и у многих звезд главной последовательности спектральных классов В—К, постоянство блеска которых до настоящего времени не вызывало никакого сомнения [3—7]. Однако периодическая микрорегулярность обнаружена у звезд типа  $a^3$  CVn [8, 9], ZZ Cet [10—12], хорошо изучена у Новых и новоподобных звезд [13] и совсем неизвестна у антивспыхивающих звезд, если не считать нескольких эпизодических наблюдений [14]. Как образец крайне дискуссионного следует, по-видимому, считать приведенное в работе [15] утверждение о том, что всем звездам спектральных классов В, А, F, G свойственны вариации блеска в форме осцилляций.

2. *Наблюдения и метод исследования.* С целью изучения в изменениях блеска переменной звезды V 351 Ori вариаций блеска с характерными временами от единиц до десяти минут в ночи с хорошими астроклиматическими условиями и всегда вблизи меридиана были получены длительные ряды наблюдений переменной звезды и звезды сравнения (BD +  $0^\circ 1167$ )

в режиме непрерывного слежения. Все наблюдения получены на 50-см рефлекторе с использованием одноканального автоматического электрофотометра АЭФ-2 ВНБ «Терскол» ГАО АН УССР. Измерения проводились с временами накопления 1, 3, 9 и 10 секунд в фильтрах  $U$  и  $B$ . Всего в течение 1978—1983 гг. было получено 13 рядов наблюдений для каждого из объектов (ряды за JD 2442719 были любезно предоставлены в наше распоряжение А. Ф. Пугачем). В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены фрагменты оригинальных рядов наблюдений переменной и звезды сравнения в три даты, когда квазирегулярный характер изменений блеска переменной звезды прослеживается особенно четко и заметен «на глаз» (время накопления — 10 сек., фильтр  $U$ ):

- а) JD 2445224 — звезда находилась в нормальном состоянии;
- б) JD 2445238 — блеск звезды на  $0^m3$  ( $V$ ) ниже нормального;
- в) JD 2445242 — звезда находилась в минимуме блеска, яркость на  $1^m6$  ( $V$ ) ослаблена по сравнению с нормальной.

Однако в остальные ночи видимой регулярности в изменениях блеска не просматривается, поэтому представляет интерес вопрос о возможности детектирования переменности статистическими методами. Прежде всего убедимся в реальности изменений блеска переменной звезды. Будем рассматривать полученные нами в течение ночи ряды значений яркости переменной и звезды сравнения как выборку значений случайной величины  $I$  (интенсивность). Предположим, что случайная величина  $I$  распределена случайно с дисперсией  $\sigma^2$  вокруг среднего значения  $I_0$ , т. е. функция Гаусса

$$G(I) = (2\pi\sigma)^{-1} \exp\left\{-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

есть плотность вероятности для величины  $I$ . При таком предположении выборочная дисперсия

$$s^2 = (n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n (I_i - I_0)^2$$

является также случайной величиной и обладает тем свойством, что величина

$$\eta = (n-1) \frac{s^2}{\sigma^2}$$

распределена по закону  $\chi^2$  с  $n-1$  степенями свободы [15].

Очевидно, что вычисленные для каждой ночи значения  $s_i^2$  будут с высокой степенью вероятности различаться не только для переменной (что

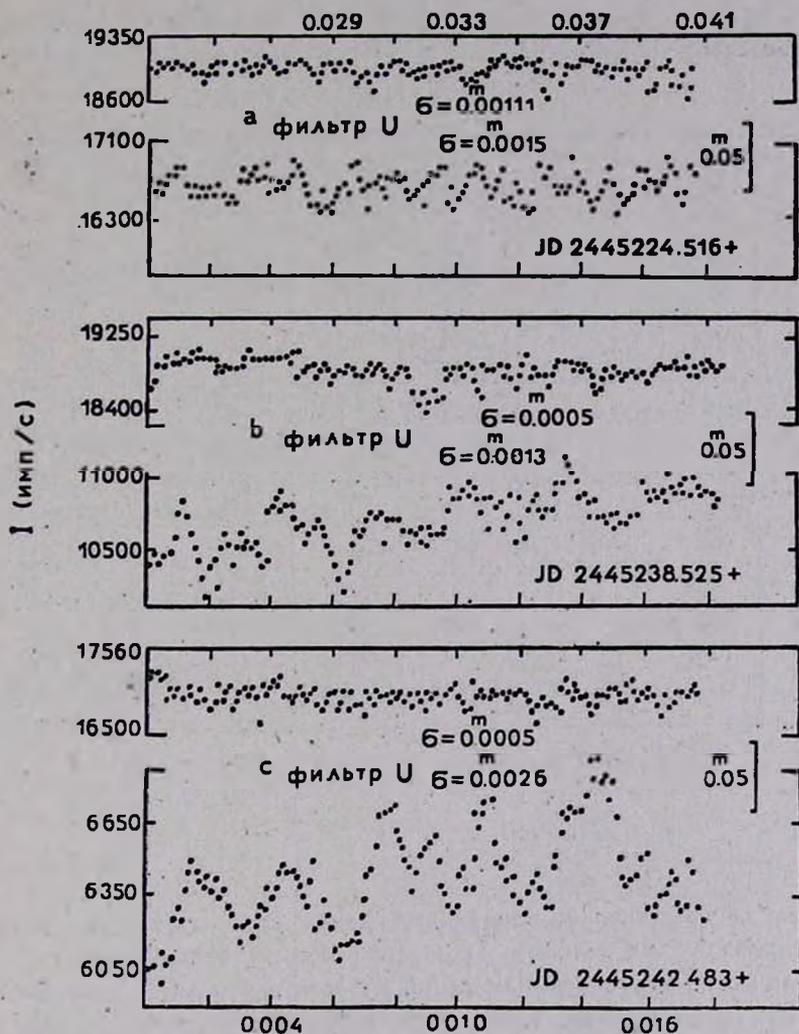


Рис. 1. Изменения блеска переменной V 351 Ori и звезды сравнения — в нижней и верхней частях каждого из фрагментов рисунка соответственно. В таком же порядке выполнена разбивка оси абсцисс.

само по себе не должно вызывать особого удивления), но и для звезды сравнения, постоянство блеска которой контролировалось в течение каждой ночи путем сравнения ее с контрольной звездой. Однако различие совокупности величин  $s_i^2$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ , где  $N$  — количество ночей наблю-

дений) будет статистически незначимым (т. е. отклонение каждой из  $s_i^2$  от  $\sigma^2$  будет естественным образом объясняться существующим статистическим разбросом выборочных оценок  $s_i^2$ ).

Значения выборочных дисперсий  $s_i^2$  для переменной и звезды сравнения приведены в табл. 1, столбцы 6 и 7. Кроме того, в столбцах 1—5 табл. 1

Таблица 1

№	JD 2440000+	Фильтр	n		$s^2$ (зв. вел.) <sup>2</sup> ·10 <sup>6</sup>		F
			перем.	зв. ср.	перем.	зв. ср.	
1	4632	B	152	187	269	104	2.01
2	4639	B	358	380	270	97	2.16
3	4887.1	B	401	357	241	67	3.00
4	4887.11	B	603	734	280	46	3.91
Среднее за 4 ночи					265	78	
$\eta_4$					104.11	5.41	
$P(\eta > \eta_4)$					~0	0.71	
5	5224	U	226	241	356	246	1.45
6	5238	U	230	250	284	105	2.70
7	5240	U	250	241	290	75	3.87
8	5241	U	197	208	231	87	2.66
9	5242	U	152	171	186	96	1.94
Среднее за 5 ночей					269	122	
$\eta_5$					171.79	4.73	
$P(\eta > \eta_5)$					~0	0.54	

приведены соответственно: порядковый номер ряда; юлианская дата наблюдений; фильтр, в котором получены наблюдения в соответствующую ночь; количество одиночных измерений яркости переменной и звезды сравнения. Как видно из табл. 1, значения выборочных дисперсий для звезды сравнения заметно варьируют от ночи к ночи. Поэтому вполне закономерен вопрос о степени постоянства блеска ее в те ночи, когда были получены одновременно длительные ряды наблюдений обоих объектов. Для оценки значимости различий выборочных дисперсий можно воспользоваться критерием Бартлетта [18]. Для этого нами был вычислен параметр  $\eta_N$  по формуле:

$$\eta_N = \left\{ N \ln \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (n_i - 1) s_i^2 \right] - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln s_i^2 \right\} \times \\ \times \left[ 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left( \frac{1}{(n_i - 1)} - \frac{1}{N} \right) \right],$$

где  $n_i$  — объемы отдельных выборок;  $N$  — их сумма;  $k$  — количество рядов (выборочных дисперсий). Бартлеттом [18] было показано, что параметр  $\eta_N$  распределен по закону  $\chi^2$  с  $k-1$  степенями свободы, с плотностью вероятности

$$P_{k-1}(\eta) = \frac{\eta^{\frac{k-3}{2}} \exp\left(-\frac{\eta}{2}\right)}{2^{\frac{k-1}{2}} \Gamma\left(\frac{k-1}{2}\right)},$$

где символом « $\Gamma$ » обозначена гамма-функция.

Приведенные в табл. 1 значения параметра  $\eta_N$  и соответствующие плотности вероятности  $P(\eta_N)$  свидетельствуют о том, что различия выборочных дисперсий для звезды сравнения являются незначимыми, ибо вероятность случайного появления таких различий довольно высока ( $\sim 50\%$ ). Для того, чтобы с вероятностью в  $95\%$  говорить о реальности различий выборочных дисперсий звезды сравнения, необходимо, чтобы  $\eta_N \geq 15.3$ .

В то же время приведенные в табл. 1 значения  $\eta_{14}$ ,  $\eta_5$  и  $P(\eta_N)$  для переменной звезды с несомненностью свидетельствуют о том, что различия выборочных дисперсий реальны, а вероятность случайных появлений таких различий крайне мала. Следовательно, факт наличия микровариаций блеска в изменениях яркости переменной звезды не вызывает сомнений.

Сравнение значений выборочных дисперсий  $s_i^2$  для переменной звезды и звезды сравнения (табл. 1) показывает, что переменность блеска переменной звезды выражена очень четко (значения дисперсий для переменной регулярно выше соответствующих значений для звезды сравнения). Количественную оценку этого различия можно получить с помощью критерия Фишера [16]:

$$F = \frac{s_{\text{перем.}}^2}{s_{\text{ав. ср.}}^2}$$

(значения выборочного отношения  $F$  приведены в столбце 8 табл. 1). Чем больше выборочное отношение  $F$ , тем менее вероятна его случайность. Для нашего случая, используя таблицы  $F$ -распределения [17], можно сделать

вывод, что с вероятностью, большей 95%, различия дисперсий переменной звезды и звезды сравнения значимы, т. е. они определяются самим характером изменений блеска обоих объектов. И этот вариант проверки статистической значимости изменения блеска переменной звезды приводит нас к выводу о существовании мелкомасштабного компонента в изменениях ее блеска. Более того, используя критерий Фишера, можно прийти к выводу о том, что различия дисперсий переменной звезды от ночи к ночи значимы, что может являться, на наш взгляд, свидетельством нестационарного характера мелкомасштабного компонента изменений блеска переменной звезды.

Таким образом, исследование рядов наблюдений переменной звезды и звезды сравнения методами дисперсионного анализа показало статистическую значимость изменений блеска переменной звезды и подтвердило постоянство блеска звезды сравнения.

Для определения периодов регулярной составляющей в исследуемых рядах они были подвергнуты спектральному анализу с помощью метода Барга — т. н. метода САМЭ — спектрального анализа с максимальной энтропией, обладающего, согласно [19], повышенной разрешающей способностью. Преимущество этого метода, применительно к астрономическим наблюдениям, заключается в его способности выявлять периоды, сравнимые с длительностью самого анализируемого ряда (точность определения таких периодов составляет  $\sim 10\%$ ). Нами использовался вариант программы, реализованный в ГАО АН УССР и используемый для анализа широтных наблюдений [20].

3. *Результаты спектрального анализа.* В общем случае вычисленные спектры мощности могут быть представлены в виде суммы двух независимых слагаемых (рис. 2):

а) Непрерывный спектр (континуум).

б) Собственно спектральные линии (пики), соответствующие присутствующим в анализируемом ряду периодическим составляющим.

Зависимость мощности излучения  $V 351 \text{ Ori}$  в континууме от частоты почти для каждого ряда можно представить степенной функцией вида:

$$W(f) = Cf^{-z}.$$

Подобный результат получен и для переменных звезд типа Т Тау [21], для вспыхивающих звезд  $UV \text{ Cet}$  [22], причем показатель  $z$  для разных объектов меняется в пределах от 1.7 до 2.5. В нашем случае необходимо отметить относительное постоянство показателя  $z$  для звезды сравнения от ночи к ночи —  $z = 2.0 \pm 0.3$  и значительные вариации его для переменной во все ночи — от 1.4 до 2.8. Интенсивность непрерывного спектра для

всех ночей сравнивалась для периода  $P_0 = 900$  секунд, поэтому, если в исходном выражении для мощности непрерывного спектра перейти от частот к периодам и записать его в форме

$$P = C \left( \frac{P}{P_0} \right)^2,$$

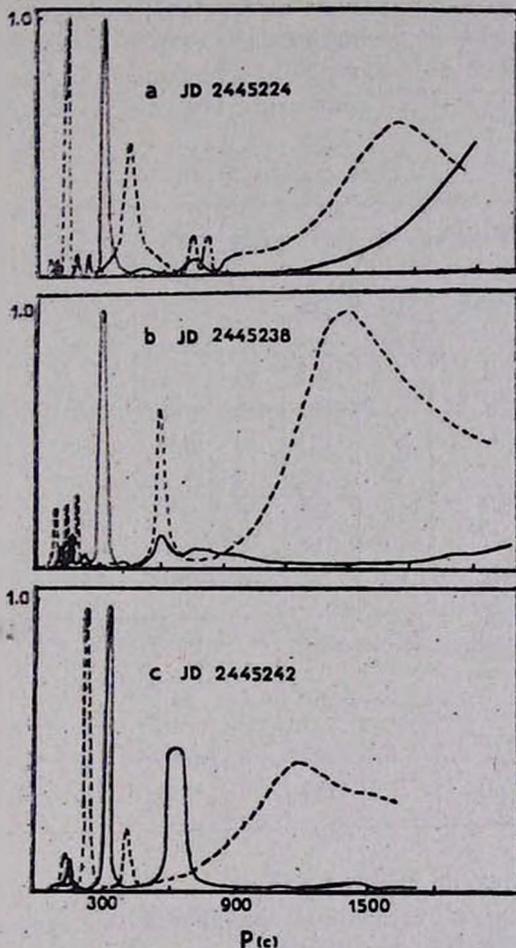


Рис. 2. Спектры мощности рядов, приведенных на рис. 1. Штриховая линия — звезда сравнения, сплошная — переменная звезда.

коэффициент  $C$  в этой формуле и будет определять интенсивность непрерывного спектра в точке  $P_0 = 900$  секунд. Значения  $C$  для разных ночей в звездных величинах приведены в последнем столбце табл. 2, в которой представлены основные результаты спектрального анализа длительных рядов наблюдений только переменной звезды в следующем порядке: номер

ряда; юлианский момент наблюдения; фильтр; время накопления; количество точек (измерений) в каждом ряду; длительность каждого ряда в условных единицах — периодах с  $P = 326$  секунд; яркость переменной в ночь наблюдения в фильтре  $V$ ; величина периода, повторяющегося в каждую из 11 ночей (при общем количестве подвергнутых анализу рядов — 13); амплитуда этого периода; интенсивность непрерывного спектра (оба последних параметра — в звездных величинах). Поскольку в две из 13 ночей спектральный анализ не показал наличия в изменениях блеска переменной периодической составляющей с периодами, близкими к периоду  $P = 326$  секунд, в табл. 2 не приведены эти результаты, однако на рис. 3 они отмечены.

Таблица 2

№	JD	Фильтр	$\Delta t$	$N$	$L$	$m_V$	$P$ (секунд)	$A$ (зв. вел.)	$C$ (зв. вел.)
1	2444632	$B$	10	152	5	8.91	329	0.016	0.0007
2	4639	$B$	10	358	12	9.04	346	0.018	0.0011
3	4887.1	$B$	10	401	13	9.48	318	0.106	0.0009
4	4887.11	$B$	1	603	2	9.48	337	0.102	0.0010
5	5224	$U$	10	226	7	8.86	324	0.056	0.0009
6	5238	$U$	10	230	7	9.27	310	0.024	0.0010
7	5240	$U$	10	250	8	8.97	324	0.058	0.0011
8	5241	$U$	10	197	6	8.97	312	0.028	0.0009
9	5242	$U$	10	152	5	10.62	335	0.150	0.0012

 $\bar{P} = 326$  секунд $\sigma_{\bar{P}} = 4$  секунды

10	4888	$B$	1	1499	6	8.99	289	0.006	0.0007
11	4889	$B$	1	1980	8	9.01	288	0.004	0.0009

В отдельные ночи на спектре мощности присутствовало более десяти пиков, соответствующих отдельным периодическим составляющим, но были и ночи, когда их количество не превышало 3—5 — это в равной степени относится к обеим звездам. Для подавляющего большинства периодических составляющих амплитуды их находились в пределах  $0^m002 \div + 0^m006$  ( $U$ ). Более половины пиков на спектрах мощности для каждой из ночей для обеих звезд соответствуют периодам  $P < 100$  секунд, причем для них процент обнаружения общих для переменной и звезды сравнения периодических составляющих намного выше ( $\sim 70\%$ ), чем для пе-

риодов с  $P > 100$  секунд. Появление общих для переменной и звезды сравнения периодических составляющих на кривых блеска, полученных в одну и ту же ночь, с интервалом всего лишь в несколько десятков минут,

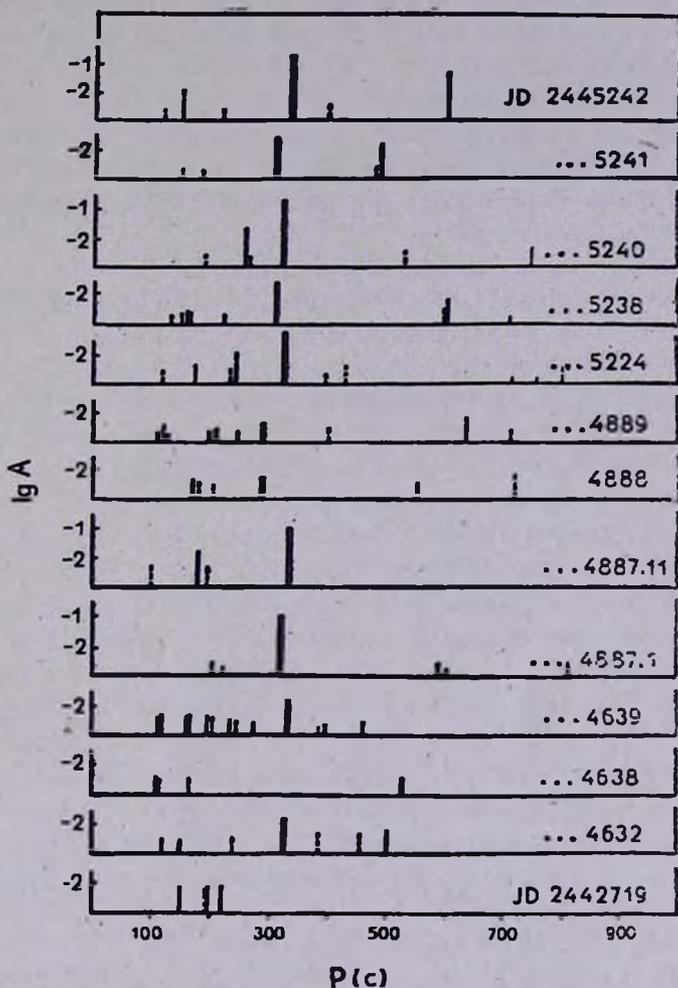


Рис. 3. Спектр микропеременности V 351 Ori и звезды сравнения, полученные по 13 ночам наблюдений (включены также два ряда, не вошедшие в табл. 2). Штриховая линия — звезда сравнения, сплошная — переменная звезда. Ось абсцисс — логарифм амплитуды в звездных величинах. Для переменной звезды значения периодов, приведенных в табл. 2, выделены толстой линией.

несомненно свидетельствует об их атмосферном или аппаратурном происхождении, и вполне естественно, что при анализе результатов спектрального анализа наблюдений подобные случаи не принимались во внимание. В большинстве случаев амплитуды периодических составляющих для пере-

менной в каждую из ночей больше амплитуды аналогичных для звезды сравнения, что может служить, на наш взгляд, подтверждением реальности существования микропеременной в изменениях блеска переменной. Поскольку привести в данной работе все полученные спектры мощности не представляется возможным, на рис. 2 приведены только спектры мощности рядов, представленных на рис. 1. Кроме того, на рис. 3 в графической форме представлены результаты спектрального анализа длительных рядов наблюдений и переменной звезды, и звезды сравнения; информация о периодических составляющих с периодами  $P < 100$  секунд, ввиду большого количества таковых, а также из-за трудностей интерпретации их происхождения, на рис. 3 не приводится.

Для 9 (из полученных 26 — по 13 для переменной и звезды сравнения) рядов, подвергнутых спектральному анализу, не было обнаружено никаких повторяющихся более 3—5 ночей периодов, кроме периода  $P = 326 \pm 4$  секунд для переменной. Кроме того, в две ночи в изменениях блеска переменной звезды обнаружена периодическая составляющая с  $P = 290$  секунд, которая, скорее всего, является самостоятельной, хотя среднее значение периода, полученное с учетом ее ( $P = 319$  секунд), всего лишь на 2% отличается от среднего значения, полученного по девяти ночам ( $P = 326$  секунд). Мы уже отмечали то достоинство метода Барга, что он достаточно эффективно выделяет периоды, сравнимые с длительностью самих анализируемых рядов. Поэтому то обстоятельство, что анализируемые ряды значительно отличаются по длительности, выраженной в единицах величины периода, не должно давать повода для сомнений в достоверности результата. Так, например, фактически одинаковые периоды — 337 и 336 секунд — были получены по рядам, отличающимся по длительности в 6 раз (JD 2444639 и ... 4878, 11). Кроме того, отличия в длительности рядов не сказались существенно и на определении амплитуды периодической составляющей — для двух рядов, ... 4887, 1 и ... 4887, 11, отличающихся по длительности в 6.5 раза, получены одинаковые амплитуды. Утверждению о том, что существует тенденция к увеличению амплитуды периодической составляющей с  $P = 326$  секунд при уменьшении общего блеска переменной, приведенные в табл. 2 результаты не противоречат (за исключением, пожалуй, рядов 6 и 8). Следует отметить и очень существенный для дальнейшей интерпретации полученных результатов факт: амплитуды периодических составляющих в спектрах мощности переменной звезды (и не только периодической составляющей с  $P = 326$  секунд) для рядов 1—4 и 10—11, полученных в фильтре  $B$ , меньше таковых для рядов 5—9, полученных в фильтре  $U$ , т. е. амплитуда периодических вариаций блеска переменной больше в ультрафиолетовой области спектра (по сравнению с голубой областью):  $\Delta m_B = 0^m.02$ ;  $\Delta m_U = 0^m.06$ . Подобной зависимости для спектров мощности звезды сравнения не обнаружено.

При анализе результатов спектрального анализа рядов наблюдений переменной звезды и звезды сравнения оказалось, что в некоторые из ночей в изменениях блеска переменной, наряду с периодом  $P = 326$  секунд, присутствуют и периоды, почти вдвое меньше: JD 2444649 — 163 секунды; ... 5238 — 161 секунда; ... 4632 — 152 секунды. Однако свидетельств наличия в изменениях блеска переменной периодических составляющих с периодами, в целое число раз большими периода  $P = 326$  секунд, обнаружить не удалось (хотя в некоторые из ночей, когда длительность ряда достигала значений 10—13 — в единицах периода  $P = 326$  секунд, — подобные периоды, если бы они существовали, могли быть выявлены). Поэтому мы вправе, по-видимому, говорить о полигармоническом характере изменений блеска переменной звезды V 351 Ориона, при этом период  $P = 326$  секунд является основным периодом (основным тоном).

Для интерпретации особенностей изменений блеска и показателей цвета переменной звезды V 351 Ori нами использовалась предложенная А. Ф. Пугачем [23] эруптивная модель антивспыхивающих звезд. В основе этой модели положено представление о том, что глобальные ослабления блеска этих звезд — антивспышки — обусловлены появлением между наблюдателем и верхними слоями фотосферы звезды облака (облаков) поглощающего вещества. Второй постулат модели — существование над фотосферой звезды области источников дополнительного излучения — некоего аналога солнечной хромосферы, необходимых для объяснения специфической и присущей только антивспыхивающим звездам двузначной зависимости «цвет—величина». В рамках этой модели удалось объяснить все наблюдавшиеся нами особенности изменения блеска и показателей цвета переменной звезды V 351 Ori [24]. Обнаруженную в настоящей работе антикорреляцию между амплитудой периодической составляющей с  $P = 326$  секунд и общим блеском переменной — в нормальном состоянии  $\Delta m = 0^m.06 (U)$ , а при ослаблении блеска на  $1^m.6 (V)$  амплитуда ее возрастает до  $0^m.15 (U)$  — можно в свете эруптивной модели антивспыхивающих звезд рассматривать как свидетельство нефотосферной природы периодической составляющей с  $P = 326$  секунд.

4. *Выводы.* 1. На основании анализа спектров мощности длительных рядов наблюдений переменной звезды V 351 Ori показан полигармонический характер микропеременности блеска. Характерные времена — от нескольких десятков секунд до десяти минут.

2. Обнаружена периодическая составляющая в изменениях блеска переменной звезды с  $P = 326 \pm 4$  секунд и амплитудой, зависящей от яркости переменной.

3. Существует отрицательная корреляция между амплитудой периодической составляющей с  $P = 326$  секунд и общим блеском переменной — при уменьшении яркости на  $1^m.6$  ( $V$ ) амплитуда периодических вариаций блеска возрастает от  $0^m.06$  ( $U$ ) до  $0^m.15$  ( $U$ ).

4. Амплитуда периодической составляющей с  $P = 326$  секунд больше в ультрафиолетовой области спектра (по сравнению с голубой областью).

5. Если исключить гипотезу о двойственности переменной, то вывод 3 в свете эруптивной модели активспыхивающих звезд можно рассматривать как свидетельство нефотосферной природы периодических вариаций блеска с периодом  $P = 326$  секунд.

6. Поскольку в течение двух ночей в изменениях блеска  $V$  351 Ori не удалось обнаружить периодических вариаций с  $P = 326$  секунд, следует весьма осторожно подходить к попыткам категорических утверждений о несомненном и постоянном присутствии в изменениях яркости переменной периодических вариаций с таким периодом, имея в виду возможную и также несомненную (как об этом свидетельствуют результаты настоящей работы) связь моментов появления и наиболее яркого проявления масштабов периодических вариаций блеска с моментами глобальных изменений состояния звезды. Именно эти соображения учитывались нами при окончательном выборе названия для этой работы.

Главная астрономическая  
обсерватория АН УССР

## ON THE V 351 ORI QUASIPERIODIC MICROVARIABILITY

G. U. KOVALCHUCK

In the variable star V 351 Ori light variations, the quasiperiodic component which have  $P = 326^s$  and variable amplitude have been found. Its amplitude is  $0^m.06$  ( $U$ ) in normal light and increased to  $0^m.15$  ( $U$ ) in minimum light. The quasiperiodic component amplitude is possibly highest in ultraviolet in comparison with the blue region of spectra.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Зайцева, Астрон. циркуляр, № 984, 3, 1978.
2. Г. В. Зайцева, В. М. Люгый, Письма в Астрон. ж., 2, 431, 1976..
3. Б. Е. Жилиев, А. Г. Тогочава, Письма в Астрон. ж., 6, 175, 1980.
4. M. Endberg, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 54, 203, 1983.

5. *H. Joergensen, K. Johansen, E. Olsen*, *Astron. and Astrophys.*, 12, 223, 1971.
6. *I. Ridpath*, *New Sci.*, 70, 526, 1976.
7. *A. G. Totochava, B. E. Zhiloev*, *Astron. Nachr.*, 302, 219, 1981.
8. *D. W. Kurtz*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 202, 1, 1983.
9. *D. W. Kurtz*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 205, 3, 1983.
10. *R. E. Nather*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 90, 477, 1978.
11. *E. L. Robinson, J. T. McGraw*, *Astrophys. J. Lett.*, 207, L 37, 1976.
12. *R. E. Stover, B. E. Nather*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 89, 912, 1977—1978.
13. *В. Г. Горбачкий*, Новоподобные и новые звезды, Наука, М., 1974.
14. *А. Ф. Пузач*, Антивспыхивающие звезды, Препринт Ин-та теор. физ. АН УССР, ИТФ—81—128Р, Киев, 1981.
15. *D. W. Kurtz*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 200, 807, 1982.
16. *В. Ю. Урбах*, Математическая статистика для биологов и медиков, Из-во АН СССР, М., 1963.
17. *Ф. Миллс*, Статистические методы, Государственное статистическое издательство, М., 1958.
18. *Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов*, Таблицы математической статистики, Наука, М., 1983.
19. *J. P. Burg*, *Geophysic*, 37, 375, 1972.
20. *А. И. Емец, Я. С. Якубя*, Астрометрия и астрофиз., вып. 26, 3, 1976.
21. *Kuan Pui*, *Astrophys. J.*, 210, 129, 1976.
22. *W. E. Kunkel*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 25, 1, 1975.
23. *А. Ф. Пузач*, *Астрофизика*, 17, 87, 1981.
24. *Г. У. Ковальчук*, Кинематика и физика небесных тел, 1, 3, 25, 1985.