ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2020, том 46, № 4, с. 263–273

ПОИСК ЭВОЛЮЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПЕРИОДА ЦЕФЕИДЫ ET Vul

© 2020 г. Л. Н. Бердников[1*], Е. Н. Пастухова[2]

[1] Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

[2] Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 26.03.2020 г.
После доработки 26.03.2020 г.; принята к публикации 31.03.2020 г.

Обработка всей имеющейся фотометрии цефеиды ET Vul позволила построить ее $O-C$ диаграмму, охватывающую временнóй интервал 130 лет. Это позволило впервые вычислить скорость эволюционного уменьшения периода $dP/dt = -426.5$ ($\pm 29,7$) с/год, что согласуется с результатами модельных расчетов для второго пересечения полосы нестабильности. Тест на стабильность пульсаций, предложенный Ломбардом и Коэном, подтвердил реальность эволюционного изменения периода.

Ключевые слова: цефеиды, изменяемость периодов, эволюция звезд.

DOI: 10.31857/S0320010820040038

ВВЕДЕНИЕ

Согласно теории, $O-C$ диаграммы цефеид за время пересечения полосы нестабильности могут быть аппроксимированы многочленом степени три или выше (Ферни, 1990), которые на типично наблюдаемом интервале времени (порядка столетия) выглядят как параболы или, в редких случаях, кубические параболы (Ферни, 1990; Бердников и др., 2007). Обнаружение парабол на $O-C$ диаграммах позволяет вычислить скорости наблюдаемых эволюционных изменений периодов. Сравнение их с модельными расчетами для разных пересечений полосы нестабильности позволяет идентифицировать номер пересечения, что в перспективе даст возможность построить зависимость период–светимость отдельно для каждого пересечения, что, в свою очередь, приведет к более точному определению расстояний цефеид.

Согласно теории звездной эволюции, чем больше масса (а значит, и период) цефеиды, тем быстрее она эволюционирует, и тем легче обнаружить параболу на ее $O-C$ диаграмме; в частности, для цефеид с периодами больше 30 дней параболы должны быть обнаружимы уже на 30-летнем интервале времени (Ферни, 1990; Фадеев, 2014). Мы изучили стабильность пульсаций 12 таких цефеид: V609 Cyg ($P = 31^{\mathrm{d}}.1$) (Бердников и др., 2019), V396 Cyg ($P = 33^{\mathrm{d}}.3$) (Бердников, Пастухова, 2012), EV Aql ($P = 38^{\mathrm{d}}.7$) (Бердников, 1994), NSV 9159=V2641 Oph ($P = 38^{\mathrm{d}}.9$) (Бердников и др., 2009б), RS Pup ($P = 41^{\mathrm{d}}.4$) (Бердников и др., 2009а), SV Vul ($P = 45^{\mathrm{d}}.1$) (Тэрнер, Бердников, 2004), V1467 Cyg ($P = 48^{\mathrm{d}}.6$) (Бердников и др., 2020), ASAS 101538-5933.1=V708 Car ($P = 51^{\mathrm{d}}.4$) (Бердников, 2010), GY Sge ($P = 51^{\mathrm{d}}.5$) (Бердников и др., 2007), II Car ($P = 65^{\mathrm{d}}.4$) (Бердников, Тэрнер, 2010), V1496 Aql ($P = 65^{\mathrm{d}}.4$) (Бердников и др., 2004) и S Vul ($P = 68^{\mathrm{d}}.0$) (Бердников, 1994), и оказалось, что случайные флуктуации перидов шести из них искажают их $O-C$ диаграммы настолько, что их параболическая форма становится обнаружимой только на интервале времени порядка столетия, а для двух цефеид (EV Aql и V1496 Aql) не заметна вообще. Чтобы понять причину такого несоответствия, необходимо увеличить статистику. Поэтому в данной работе мы исследуем поведение пульсаций цефеиды ET Vul, период изменения блеска которой составляет $53^{\mathrm{d}}.9$.

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Переменность ET Vul открыли Миллер и Вахман (1958а) и классифицировали ее как цефеиду

* Электронный адрес: berdnik@sai.msu.ru

Таблица 1. Наблюдательный материал цефеиды ET Vul

Источник данных	Число наблюдений	Полоса наблюдений	Интервал JD
DASCH	744	PG	2411907–2447797
Данная работа	544	PG	2411610–2447797
Литература	399	BV	2443661–2453905
NSVS	45	V	2451318–2451508
AAVSO	54	BV	2456023–2458449
INTEGRAL-OMC	1130	V	2452723–2454215
ASAS-3	220	V	2452735–2455124
ASAS-SN	1389	Vg'	2457079–2458906
ZTF	177	g'	2458204–2458663

с периодом $54^{\mathrm{d}}.3313$. Позже они (Миллер, Вахман, 1958б) опубликовали подробное исследование звезды по 314 фотопластикам, полученным в течение 34 лет, и сделали вывод, что, вероятно, она является цефеидой сферической составляющей нашей Галактики. Они также предположили возможные небольшие изменения периода. Ерлексова и Суяркова (1982) расширили интервал времени, охваченный $O-C$ диаграммой, на 20 лет и нашли значительные изменения периода, однако прогрессивные изменения периода обнаружены не были.

Для нового изучения периода ET Vul мы собрали фотоэлектрические B и V наблюдения (Харрис, 1980; Бердников, 1993; Бердников, Возякова, 1995; Бердников и др., 1997,1998; Игнатова, Возякова, 2000; Шмидт и др., 2004а), а также ПЗС-наблюдения из обзоров NSVS (Возниак и др., 2004), INTEGRAL-OMC (Альфонсо-Гарсон и др., 2012), ASAS–3 (Пойманski, 2002), ASAS–SN (Яясингхе и др., 2019) и ZTF (Маски и др., 2019), полученные в полосах, близких к V и g'. Мы также использовали ПЗС-наблюдения в фильтрах B и V из Международной базы данных AAVSO (Кафка, 2020).

Кроме того, мы использовали данные проекта DASCH (Гриндлей и др., 2009), полученные на оцифрованных старых фотографических пластинках университета Гарварда (США), а также сделанные нами глазомерные оценки блеска на этих же фотопластинках. Следует отметить, что глазомерные оценки позволяют лучше отделять различные дефекты, искажающие звездные изображения, особенно для слабых звезд, что позволило получить больше данных на самых старых фотопластинках, чувствительность которых была низкой.

Для изучения изменяемости периодов цефеид мы применяем общепринятую методику анализа $O-C$ диаграмм, а самым точным методом определения остатков $O-C$ является метод Герцшпрунга (1919), машинная реализация которого описана в работе Бердникова (1992). Для подтверждения реальности обнаруженных изменений периода мы используем метод, описанный Ломбардом и Коэном (1993).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сведения о количестве использованных наблюдений приведены в табл. 1. Самая старая фотопластинка с изображением ET Vul, хранящаяся в Гарварде, была получена в 1890 г., а последние ПЗС наблюдения были сделаны в 2020 г. Следовательно, наши данные охватывают временно́й интервал 130 лет.

Результаты обработки сезонных кривых ET Vul приведены в табл. 2. В первой и второй колонке даны моменты максимального блеска и ошибки их определения, в третьей — тип используемых наблюдений, в четвертой и пятой — номер эпохи E и значение остатка $O-C$, а в шестой и седьмой — число наблюдений N и источник данных. Данные табл. 2 изображены на $O-C$ диаграмме (рис. 1) пустыми кружками и квадратиками для фотографических наблюдений из проекта DASCH и глазомерных оценок соответственно и точками для остальных наблюдений с вертикальными черточками, указывающими пределы ошибок определения остатков $O-C$.

К сожалению, Миллер и Вахман (1958б), а также Ерлексова и Суяркова (1982) не опубликовали сделанные ими наблюдения, а привели только

Таблица 2. Моменты максимума блеска ET Vul

Максимум, HJD	Ошибка, сут	Фильтр	E	$O-C$, сут	N	Источник данных
2413044.280	1.668	PG	−423	−29.792	25	Данная работа
2415363.390	3.081	PG	−380	−26.091	10	DASCH
2415630.962	1.459	PG	−375	−27.752	23	Данная работа
2420249.073	2.369	PG	−289	−40.459	14	Данная работа
2421043.252	2.418	PG	−274	−53.981	10	DASCH
2424181.109	1.092	PG	−216	−39.232	37	Данная работа
2424617.330	1.042	PG	−208	−33.786	51	DASCH
2425110.627	–	PG	−199	−25.109	1	Миллер и Вахман (1958б)
2425706.067	0.827	PG	−188	−21.982	77	Данная работа
2426194.222	0.841	PG	−179	−18.448	71	DASCH
2426465.826	0.917	PG	−174	−16.077	57	Данная работа
2426573.474	–	PG	−172	−16.123	1	Миллер и Вахман (1958б)
2427757.691	2.152	PG	−150	−16.534	17	Данная работа
2428295.818	0.722	PG	−140	−16.874	94	DASCH
2428778.463	1.400	PG	−131	−18.848	34	Данная работа
2429741.492	0.704	PG	−113	−25.061	93	DASCH
2429744.188	1.123	PG	−113	−22.365	38	Данная работа
2430715.513	0.796	PG	−95	−20.280	71	DASCH
2430930.367	0.899	PG	−91	−20.813	16	Данная работа
2432336.573	1.088	PG	−65	−14.622	73	DASCH
2432766.349	–	PG	−57	−15.620	19	Миллер и Вахман (1958б)
2432822.023	–	PG	−56	−13.792	3	Миллер и Вахман (1958б)
2432875.795	–	PG	−55	−13.867	6	Миллер и Вахман (1958б)
2433150.516	1.251	PG	−50	−8.379	15	Данная работа
2433528.124	–	PG	−43	−7.699	10	Миллер и Вахман (1958б)
2433532.721	1.249	PG	−43	−3.101	40	DASCH
2433908.332	–	PG	−36	−4.417	15	Миллер и Вахман (1958б)
2434126.681	–	PG	−32	−1.455	16	Миллер и Вахман (1958б)
2434232.596	–	PG	−30	−3.234	13	Миллер и Вахман (1958б)
2434614.923	–	PG	−23	2.166	43	Миллер и Вахман (1958б)
2434669.836	–	PG	−22	3.233	17	Миллер и Вахман (1958б)
2434994.534	–	PG	−16	4.850	18	Миллер и Вахман (1958б)
2435048.143	–	PG	−15	4.613	13	Миллер и Вахман (1958б)

Таблица 2. Продолжение

Максимум, HJD	Ошибка, сут	Фильтр	E	$O-C$, сут	N	Источник данных
2435103.002	–	PG	−14	5.625	7	Миллер и Вахман (1958б)
2435319.992	–	PG	−10	7.228	24	Миллер и Вахман (1958б)
2435373.384	–	PG	−9	6.773	40	Миллер и Вахман (1958б)
2435428.080	–	PG	−8	7.623	20	Миллер и Вахман (1958б)
2436342.480	–	PG	9	6.629	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2437043.360	–	PG	22	7.501	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2437310.660	–	PG	27	5.568	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2438225.600	–	PG	44	5.114	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2438656.990	–	PG	52	5.730	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2439253.550	–	PG	63	9.976	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2439363.300	–	PV	65	11.641	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2440121.770	–	PG	79	16.649	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2440226.575	5.202	PG	81	13.760	14	DASCH
2440879.150	–	PV	93	19.783	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2441149.720	–	PG	98	21.511	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2441902.750	–	PG	112	20.687	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2442279.416	1.352	PG	119	20.426	26	Данная работа
2442599.280	–	PG	125	17.210	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2442918.852	0.788	PG	131	13.702	63	DASCH
2443025.780	–	PG	133	12.936	–	Ерлексова и Суяркова (1982)
2443293.873	1.138	PG	138	11.796	38	Данная работа
2443827.120	0.331	V	148	6.184	15	Харрис (1980)
2444467.451	1.123	PG	160	0.747	21	Данная работа
2445327.502	0.898	PG	176	−0.750	92	DASCH
2445383.070	1.215	PG	177	0.971	30	Данная работа
2446081.676	1.180	PG	190	−0.430	32	Данная работа
2446775.758	0.881	PG	203	−6.356	28	Данная работа
2446829.425	0.927	PG	204	−6.535	62	DASCH
2447469.511	1.880	PG	216	−12.610	16	Данная работа
2448859.282	0.243	B	242	−22.853	27	Бердников (1993)
2448859.661	0.276	V	242	−22.866	27	Бердников (1993)
2449605.790	0.472	B	256	−30.199	8	Бердников и Возякова (1995)
2449607.117	0.343	V	256	−29.264	8	Бердников и Возякова (1995)
2449979.353	0.348	V	263	−33.955	36	Бердников и др. (1997)

Таблица 2. Окончание

Максимум, HJD	Ошибка, сут	Фильтр	E	$O-C$, сут	N	Источник данных
2450298.112	0.167	V	269	−38.277	37	Бердников и др. (1998)
2450298.672	0.163	B	269	−37.325	37	Бердников и др. (1998)
2450618.317	0.263	B	275	−40.760	26	Игнатова и Возякова (2000)
2450618.392	0.314	V	275	−41.077	29	Игнатова и Возякова (2000)
2450989.837	0.239	B	282	−46.167	27	Игнатова и Возякова (2000)
2450990.645	0.288	V	282	−45.751	27	Игнатова и Возякова (2000)
2451044.179	0.815	V	283	−46.064	12	Шмидт и др. (2004а)
2451420.070	0.473	V	290	−47.099	45	NSVS
2452597.177	0.208	V	312	−54.620	29	Шмидт и др. (2004а)
2452920.146	0.288	V	318	−54.731	55	ASAS-3
2453677.001	0.310	V	332	−51.730	58	ASAS-3
2453945.378	0.069	V	337	−52.587	550	INTEGRAL-OMC
2454108.964	0.057	V	340	−50.541	580	INTEGRAL-OMC
2454538.781	0.332	V	348	−51.497	70	ASAS-3
2455022.703	0.473	V	357	−52.196	37	ASAS-3
2456158.845	1.270	V	378	−46.834	10	AAVSO
2457230.419	0.104	V	398	−52.195	80	ASAS-SN
2457497.880	0.110	V	403	−53.967	71	ASAS-SN
2457657.509	0.089	V	406	−55.879	110	ASAS-SN
2457871.177	0.108	V	410	−57.598	89	ASAS-SN
2457978.048	0.081	V	412	−58.420	89	ASAS-SN
2458244.286	0.149	g'	417	−61.113	73	ZTF
2458244.813	0.121	V	417	−60.888	81	ASAS-SN
2458350.923	0.129	g'	419	−62.169	68	ZTF
2458351.266	0.080	g'	419	−61.826	141	ASAS-SN
2458351.563	0.139	V	419	−61.832	23	AAVSO
2458351.575	0.093	V	419	−61.820	79	ASAS-SN
2458405.092	0.156	B	420	−61.757	21	AAVSO
2458565.654	0.103	g'	423	−62.825	204	ASAS-SN
2458620.290	0.115	g'	424	−62.036	36	ZTF
2458673.827	0.178	g'	425	−62.345	66	ASAS-SN
2458674.043	0.050	g'	425	−62.129	182	ASAS-SN
2458674.297	0.151	g'	425	−61.875	95	ASAS-SN
2458727.397	0.109	g'	426	−62.622	102	ASAS-SN

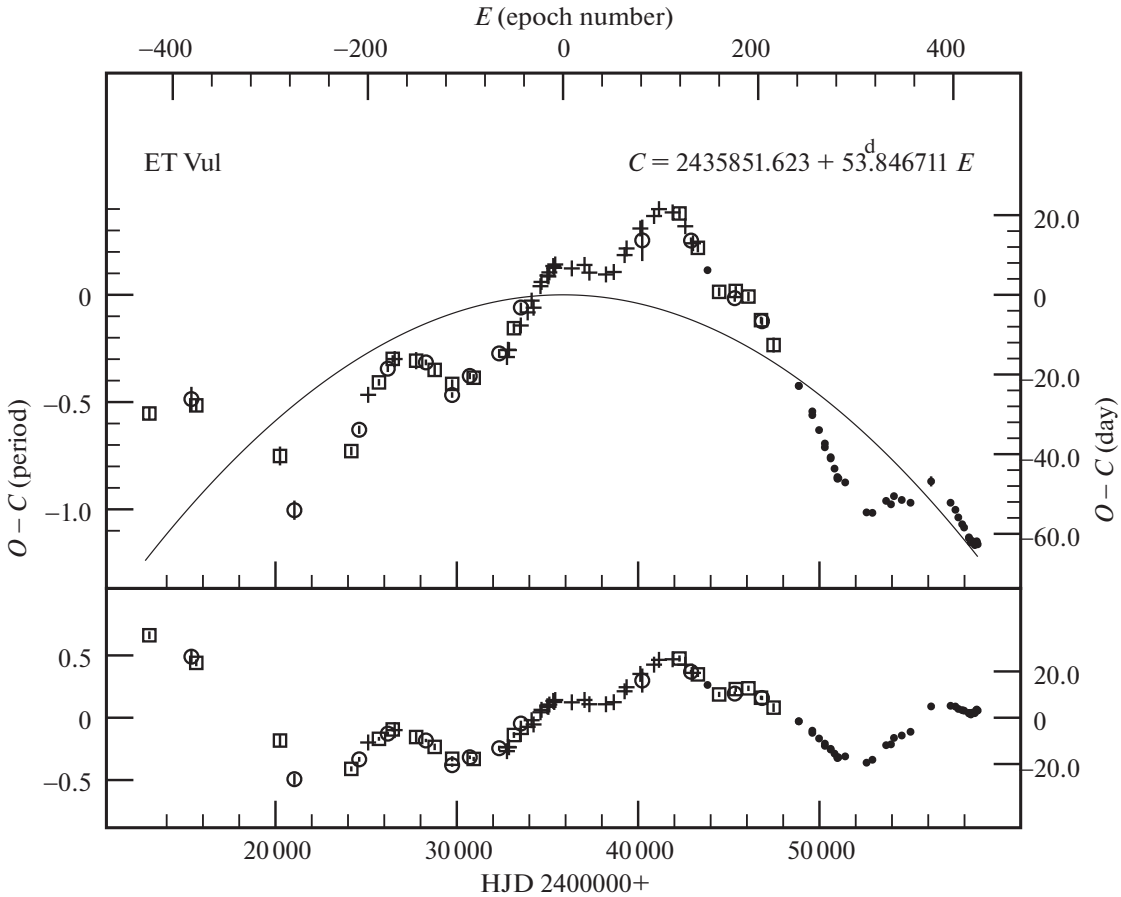

Рис. 1. $O-C$ диаграмма для цефеиды ET Vul относительно линейных (вверху) и квадратичных (внизу) элементов (1). Линия — парабола, соответствующая элементам (1).

полученные на их основе моменты максимального блеска, которые мы включили в табл. 2; для этих моментов во второй колонке стоит прочерк, а на рис. 1 они изображены крестиками.

По моментам максимального блеска из табл. 2 получены квадратные элементы изменения блеска цефеиды ET Vul:

$$Max\ HJD = 2435851.623(\pm 1.820) + \qquad (1)$$
$$+ 53^{\mathrm{d}}.84671079(\pm 0.00735)E -$$
$$- 0.363886 \times 10^{-3}\ (\pm 0.253 \times 10^{-4})E^2,$$

линейная часть которых использована для вычислений остатков $O-C$ в пятом столбце табл. 2. Элементы (1) использовались для проведения параболы на верхней части рис. 1, на нижней части которого показаны отклонения от этой параболы.

Известно, что для пульсирующих переменных максимумы блеска наступают позже с ростом эффективной длины волны фотометрической полосы. Поэтому, когда используются данные, полученные в разных полосах, надо выбрать основную (в нашем случае это V) и по одновременным наблюдениям определить величины сдвига моментов максимального блеска в других полосах. По фотоэлектрическим и ПЗС-наблюдениям было найдено, что максимумы в фильтрах B и g' наступают раньше, чем в фильтре V, на $0^{\mathrm{d}}.393$ и $0^{\mathrm{d}}.303$ соответственно. Эти поправки учитывались при построении рис. 1 и определении элементов (1), которые, таким образом, относятся к системе V.

Для подтверждения реальности изменений периода пульсаций мы используем метод, опубликованный Ломбардом и Коэном (1993). Для этого мы вычислили разности $\Delta(O-C)_i$ последовательных остатков $O-C$ из табл. 2, $\Delta(O-C)_i = (O-C)_{i+1} - (O-C)_i$, и построили график зависимости $D_i = \Delta(O-C)_i/(E_{i+1}-E_i)$ от $E'_i = (E_i + E_{i+1})/2$ (рис. 2). Разности D_i, которые имеют смысл изменений периода в интервале эпох $E_i - E_{i+1}$, соответствуют поведению остатков $O-C$ на рис. 1.

Харрис (1981б), используя наблюдения в Вашингтонской системе (Кантерна, 1976; Харрис и Кантерна, 1979), определил металличность ET Vul

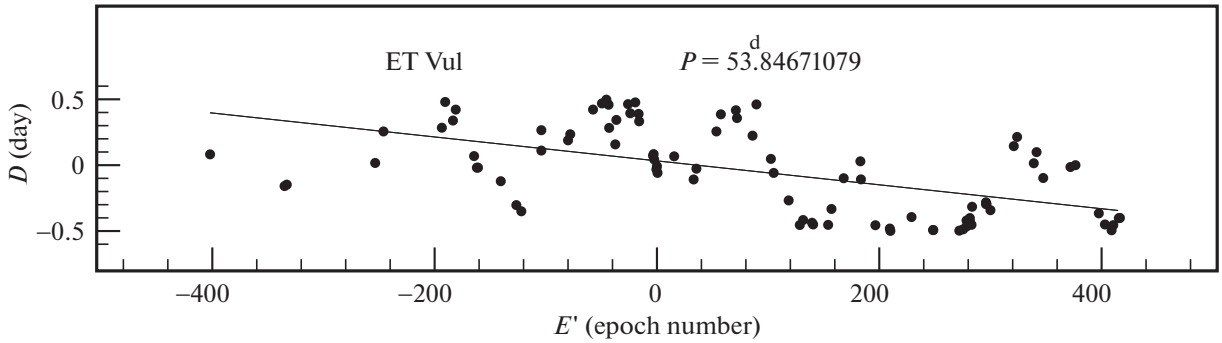

Рис. 2. Зависимость $D_i = ((O-C)_{i+1} - (O-C)_i)/(E_{i+1} - E_i)$ от $E'_i = (E_i + E_{i+1})/2$. Линия соответствует поведению остатков $O-C$ на рис. 1.

$[A/H] = -0.4$ dex, и это, вместе с необычной кривой блеска и большим расстоянием от плоскости Галактики (Миллер и Вахман, 1958б; Шмидт и др., 2004а), послужило доказательствами принадлежности звезды к населению II.

Однако Шмидт и др. (2004б) не обнаружили эмиссию в линиях водорода и гелия, которая типична для цефеид сферической составляющей Галактики, а большое расстояние от плоскости Галактики можно объяснить тем обстоятельством, что сам галактический диск искривляется в этом направлении (Бердников, 1987; Сковрон и др., 2019), поэтому следует говорить не о расстоянии от некоей математической плоскости, а от реального диска. Сейчас известны долгопериодические классические цефеиды с похожими кривыми блеска, например: GY Sge ($P = 51^{\mathrm{d}}.6$), S Vul ($P = 68^{\mathrm{d}}.0$)

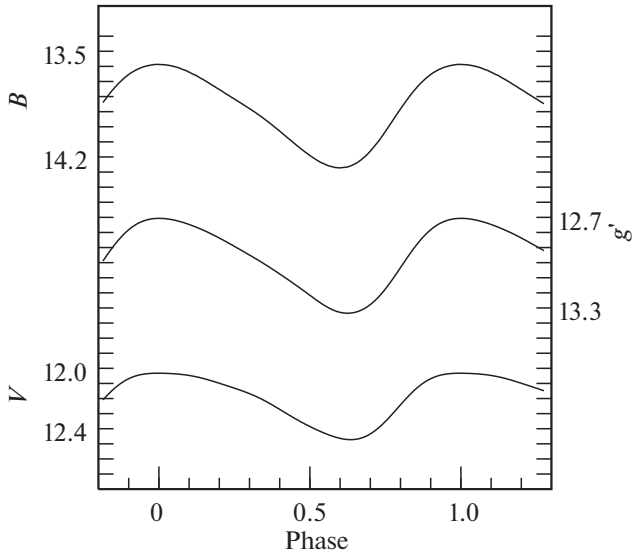

Рис. 3. Стандартные кривые цефеиды ET Vul в системе BVg'.

(Бердников, 1994). Кроме того, существует радиальный градиент металличности в диске Галактики (Харрис, 1981а; Лак, Ламберт, 2011; Лак, 2018) $d[\mathrm{Fe/H}]/dR \approx -0.06$ dex кпк$^{-1}$, т.е. классические цефеиды на расстояниях 12–16 кпк от центра Галактики должны иметь металличность порядка $-$ -0.4 dex. Согласно данным Gaia DR2 (Браун и др., 2018), параллакс ET Vul равен 0.0099 ± 0.0351 миллисекунд дуги, однако имеется ряд работ (Райс и др., 2018; Ялялиева и др., 2018; Шонрих и др., 2019; Леунг, Бови, 2019), где показано, что к параллаксам Gaia необходима поправка порядка $+$ $+0.05$ мсек. дуги, т.е. расстояние до звезды составляет 16.7 ± 9.7 кпк. А если определить фотометрическое расстояние ET Vul так же, как для классических цефеид (Бердников и др., 2000), то получим 13.86 кпк, что в пределах ошибок согласуется с данными Gaia и соответствует галактоцентрическому расстоянию 12.27 кпк.

Таким образом, мы заключаем, что ET Vul является классической цефеидой.

Квадратичный член элементов (1) дает возможность вычислить скорость эволюционного уменьшения периода $dP/dt = -426.5$ ($\pm 29,7$) с/год, что соответствует теоретическим расчетам для второго пересечения полосы нестабильности (Тэрнер и др., 2006; Фадеев, 2014) для классических цефеид.

Отметим, что полученные здесь результаты основаны на конкретных стандартных кривых. Поэтому мы приводим их в табл. 3 с тем, чтобы их можно было использовать в будущих исследованиях, а также для установления связи с нашими данными, если будут использоваться другие стандартные кривые. Таблица 3 содержит звездные величины ET Vul для фаз от 0 до 0.995 с шагом 0.005 в системе BVg'; эти стандартные кривые графически изображены на рис. 3.

Таблица 3. Стандартные кривые ET Vul в фильтрах B, g' и V

Фаза	B	g'	V	Фаза	B	g'	V	Фаза	B	g'	V
0.000	13.587	12.707	12.032	0.335	13.927	12.991	12.199	0.670	14.219	13.315	12.462
0.005	13.588	12.707	12.032	0.340	13.934	12.997	12.204	0.675	14.210	13.310	12.459
0.010	13.588	12.707	12.033	0.345	13.942	13.003	12.209	0.680	14.202	13.305	12.455
0.015	13.589	12.708	12.033	0.350	13.949	13.009	12.214	0.685	14.193	13.299	12.451
0.020	13.589	12.708	12.033	0.355	13.957	13.016	12.219	0.690	14.183	13.293	12.446
0.025	13.591	12.710	12.033	0.360	13.964	13.022	12.225	0.695	14.173	13.286	12.441
0.030	13.592	12.711	12.034	0.365	13.972	13.028	12.230	0.700	14.162	13.278	12.435
0.035	13.594	12.712	12.034	0.370	13.980	13.035	12.236	0.705	14.150	13.270	12.428
0.040	13.596	12.714	12.035	0.375	13.988	13.041	12.242	0.710	14.139	13.262	12.422
0.045	13.598	12.716	12.035	0.380	13.996	13.048	12.248	0.715	14.126	13.253	12.414
0.050	13.601	12.718	12.036	0.385	14.004	13.055	12.253	0.720	14.114	13.243	12.407
0.055	13.603	12.720	12.037	0.390	14.012	13.061	12.259	0.725	14.102	13.233	12.399
0.060	13.606	12.722	12.038	0.395	14.020	13.068	12.265	0.730	14.089	13.222	12.390
0.065	13.609	12.725	12.038	0.400	14.028	13.075	12.271	0.735	14.075	13.211	12.381
0.070	13.613	12.728	12.039	0.405	14.037	13.081	12.278	0.740	14.061	13.199	12.372
0.075	13.617	12.731	12.040	0.410	14.045	13.088	12.284	0.745	14.046	13.187	12.362
0.080	13.621	12.734	12.041	0.415	14.054	13.095	12.290	0.750	14.032	13.175	12.352
0.085	13.624	12.737	12.043	0.420	14.062	13.102	12.296	0.755	14.017	13.162	12.342
0.090	13.628	12.740	12.044	0.425	14.071	13.109	12.302	0.760	14.002	13.149	12.331
0.095	13.633	12.743	12.045	0.430	14.079	13.116	12.308	0.765	13.987	13.135	12.321
0.100	13.638	12.747	12.047	0.435	14.087	13.122	12.314	0.770	13.972	13.121	12.310
0.105	13.643	12.751	12.049	0.440	14.095	13.129	12.320	0.775	13.957	13.107	12.299
0.110	13.648	12.754	12.050	0.445	14.104	13.136	12.325	0.780	13.942	13.093	12.287
0.115	13.653	12.758	12.052	0.450	14.112	13.143	12.331	0.785	13.927	13.078	12.276
0.120	13.657	12.762	12.054	0.455	14.121	13.150	12.337	0.790	13.912	13.063	12.265
0.125	13.662	12.766	12.056	0.460	14.129	13.158	12.343	0.795	13.897	13.049	12.253
0.130	13.668	12.770	12.059	0.465	14.137	13.165	12.348	0.800	13.883	13.034	12.242
0.135	13.674	12.774	12.061	0.470	14.145	13.172	12.354	0.805	13.868	13.019	12.231
0.140	13.680	12.779	12.064	0.475	14.153	13.179	12.359	0.810	13.854	13.004	12.220
0.145	13.685	12.783	12.066	0.480	14.160	13.186	12.365	0.815	13.840	12.989	12.209
0.150	13.691	12.788	12.069	0.485	14.168	13.194	12.370	0.820	13.826	12.974	12.198
0.155	13.697	12.792	12.071	0.490	14.175	13.201	12.375	0.825	13.813	12.960	12.187
0.160	13.703	12.797	12.074	0.495	14.183	13.208	12.380	0.830	13.799	12.946	12.177

Таблица 3. Окончание

Фаза	B	g'	V	Фаза	B	g'	V	Фаза	B	g'	V
0.165	13.709	12.801	12.077	0.500	14.190	13.216	12.385	0.835	13.786	12.931	12.167
0.170	13.716	12.806	12.080	0.505	14.197	13.223	12.390	0.840	13.773	12.918	12.157
0.175	13.722	12.811	12.083	0.510	14.204	13.231	12.395	0.845	13.761	12.904	12.148
0.180	13.728	12.816	12.086	0.515	14.210	13.238	12.400	0.850	13.750	12.891	12.139
0.185	13.734	12.821	12.089	0.520	14.217	13.245	12.405	0.855	13.738	12.878	12.130
0.190	13.741	12.826	12.092	0.525	14.223	13.252	12.409	0.860	13.727	12.866	12.121
0.195	13.747	12.831	12.095	0.530	14.229	13.259	12.414	0.865	13.716	12.854	12.113
0.200	13.753	12.837	12.099	0.535	14.235	13.266	12.418	0.870	13.706	12.842	12.106
0.205	13.759	12.842	12.102	0.540	14.239	13.273	12.422	0.875	13.697	12.831	12.099
0.210	13.765	12.847	12.105	0.545	14.244	13.279	12.427	0.880	13.687	12.820	12.092
0.215	13.772	12.853	12.108	0.550	14.248	13.285	12.431	0.885	13.678	12.810	12.085
0.220	13.779	12.858	12.112	0.555	14.253	13.291	12.435	0.890	13.670	12.800	12.080
0.225	13.785	12.864	12.115	0.560	14.257	13.297	12.439	0.895	13.662	12.791	12.074
0.230	13.791	12.869	12.118	0.565	14.260	13.302	12.442	0.900	13.654	12.782	12.069
0.235	13.797	12.875	12.121	0.570	14.263	13.307	12.446	0.905	13.647	12.774	12.064
0.240	13.804	12.881	12.125	0.575	14.265	13.312	12.449	0.910	13.640	12.767	12.060
0.245	13.810	12.886	12.128	0.580	14.268	13.316	12.453	0.915	13.635	12.759	12.056
0.250	13.816	12.892	12.131	0.585	14.270	13.320	12.456	0.920	13.629	12.753	12.053
0.255	13.822	12.898	12.135	0.590	14.271	13.323	12.458	0.925	13.623	12.747	12.050
0.260	13.829	12.903	12.138	0.595	14.272	13.326	12.461	0.930	13.619	12.741	12.047
0.265	13.835	12.909	12.142	0.600	14.272	13.329	12.464	0.935	13.614	12.736	12.044
0.270	13.841	12.915	12.145	0.605	14.271	13.331	12.466	0.940	13.610	12.731	12.042
0.275	13.847	12.920	12.149	0.610	14.270	13.333	12.468	0.945	13.606	12.727	12.040
0.280	13.854	12.926	12.152	0.615	14.269	13.334	12.469	0.950	13.603	12.723	12.038
0.285	13.860	12.932	12.156	0.620	14.268	13.335	12.471	0.955	13.600	12.720	12.037
0.290	13.867	12.938	12.160	0.625	14.266	13.335	12.472	0.960	13.597	12.717	12.036
0.295	13.873	12.943	12.163	0.630	14.263	13.335	12.472	0.965	13.595	12.715	12.035
0.300	13.880	12.949	12.167	0.635	14.259	13.334	12.472	0.970	13.593	12.712	12.034
0.305	13.886	12.955	12.172	0.640	14.255	13.333	12.472	0.975	13.591	12.711	12.033
0.310	13.893	12.961	12.176	0.645	14.250	13.331	12.472	0.980	13.590	12.709	12.033
0.315	13.899	12.967	12.180	0.650	14.245	13.329	12.471	0.985	13.588	12.708	12.033
0.320	13.906	12.973	12.185	0.655	14.240	13.326	12.469	0.990	13.587	12.707	12.033
0.325	13.913	12.979	12.189	0.660	14.233	13.323	12.467	0.995	13.587	12.707	12.032
0.330	13.920	12.985	12.194	0.665	14.226	13.319	12.465				

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения изменяемости периода ET Vul использовалось 1288 оценок блеска на старых фотопластинках университета Гарварда (США); кроме того, было собрано 3414 опубликованных наблюдений. Все имеющиеся данные были обработаны методом Герцшпрунга (1919), и был определен 101 момент максимального блеска для построения $O-C$ диаграммы, охватывающей временно́й интервал 130 лет. Это позволило определить квадратичные элементы изменения блеска (1) и вычислить скорость эволюционного уменьшения периода $dP/dt = -426.5$ $(\pm 29,7)$ с/год. Имеющиеся данные указывают на то, что ET Vul является классической цефеидой, и найденное прогрессивное изменение ее периода согласуется с результатами модельных расчетов для второго пересечения полосы нестабильности (Тэрнер и др., 2006; Фадеев, 2014). Тест на стабильность пульсаций, предложенный Ломбардом и Коэном (1993), подтвердил реальность уменьшения периода.

Данная работа осуществлялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 18-02-00890 и 19-02-00611).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альфонсо-Гарсон и др. (J. Alfonso-Garzon, A. Domingo, J.M. Mas-Hesse, and A. Gimenez), Astron. Astrophys. **548**, A79 (2012).
2. Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. **13**, 110 (1987) [L.N. Berdnikov, Sov. Astron. Lett. **13**, 45 (1987)].
3. Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. **18**, 519 (1992) [L.N. Berdnikov, Sov. Astron. Lett. **18**, 207 (1992)].
4. Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. **19**, 210 (1993) [L.N. Berdnikov, Sov. Astron. Lett. **19**, 84 (1993)].
5. Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. **20**, 285 (1994) [L.N. Berdnikov, Sov. Astron. Lett. **20**, 232 (1994)].
6. Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. **36**, 600 (2010) [L.N. Berdnikov, Sov. Astron. Lett. **36**, 569 (2010)].
7. Бердников Л.Н., Белинский А.А., Пастухова Е.Н., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Мишин Е.О., Письма в Астрон. журн. **46**, 163 (2020) [L.N. Berdnikov, A.A. Belinskij, E.N. Pastukhova, M.A. Burlak, N.P. Ikonnikova, and E.O. Mishin, Sov. Astron. Lett. **46**, N3 (2020)]
8. Бердников Л.Н., Возякова О.В., Письма в Астрон. журн. **21**, 348 (1995) [L.N. Berdnikov, and O.V. Vosyakova, Astron. Lett. **21**, 308 (1995)].
9. Бердников и др. (L.N. Berdnikov, A.K. Dambis, and O.V. Vozyakova), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **143**, 211 (2000).
10. Бердников и др. (L.N. Berdnikov, V.V. Ignatova, and O.V. Vozyakova), Astron. Astrophys. Trans. **14**, 237 (1997).
11. Бердников и др. (L.N. Berdnikov, V.V. Ignatova, and O.V. Vozyakova), Astron. Astrophys. Trans. **17**, 87 (1998).
12. Бердников Л.Н., Пастухова Е.Н., Астрон. журн. **89**, 931 (2012) [L.N. Berdnikov, and E.N. Pastukhova, Astron. Rep., **56**, 843 (2012)].
13. Бердников и др. (L.N. Berdnikov, E.N. Pastukhova, and A.K. Dambis), Astrophys. Space Sci. **364**:104 (2019).
14. Бердников и др. (L.N. Berdnikov, E.N. Pastukhova, N.A. Gorynya, A.V. Zharova, and D.G. Turner), Publ. Astron. Soc. Pacific **119**, 82 (2007).
15. Бердников Л.Н., Пастухова Е.Н., Тэрнер Д.Г., Мэйджес Д.Г., Письма в Астрон. журн. **35**, 199 (2009) [L.N. Berdnikov, E.N. Pastukhova, D.G. Turner, and D.J. Majaess, Sov. Astron. Lett. **35**, 175 (2009)].
16. Бердников и др. (L.N. Berdnikov, N.N. Samus, S.V. Antipin, O.V. Ezhkova, E.N. Pastukhova, and D.G. Turner), Publ. Astron. Soc. Pacific **116**, 536 (2004).
17. Бердников Л.Н., Тэрнер Д.Г., Астрон. журн. **87**, 436 (2010) [L.N. Berdnikov and D.G. Turner, Astron. Rep. **54**, 392 (2010)].
18. Бердников Л.Н., Хенден А.А., Тэрнер Д.Г., Пастухова Е.Н., Письма в Астрон. журн. **35**, 451 (2009) [L.N. Berdnikov, A.A. Henden, D.G. Turner, and E.N. Pastukhova, Sov. Astron. Lett. **35**, 406 (2009)].
19. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, L. Eyer, et al.), Astron. Astrophys. **616**, A1 (2018).
20. Возниак и др. (P.R. Wozniak, W.T. Vestrand, C.W. Akerlof, R. Balsano, J. Bloch, D. Casperson, S. Fletcher, G. Gisler, et al.), Astron. J. **127**, 2436 (2004).
21. Герцшпрунг (E. Hertzsprung), Astron. Nachr. **210**, 17 (1919).
22. Гриндлей и др. (J. Grindlay, Sumin Tang, E. Los, and M. Servilla), ASP Conf. Ser. **410**, 101 (2009).
23. Ерлексова Г.Е., Суяркова О.Г., Переменные Звезды Прил. **4**, 205 (1982).
24. Игнатова, Возякова (V.V. Ignatova and O.V. Vozyakova), Astron. Astrophys. Trans. **19**, 133 (2000).
25. Кантерна (R. Canterna), Astron. J. **81**, 228 (1976).
26. Кафка (S. Kafka), https://www.aavso.org (2020).
27. Лак (R.E. Luck), Astron. J. **156**:171 (24pp) (2018).
28. Лак, Ламберт (R.E. Luck and D.L. Lambert), Astron. J. **142**:136 (16pp) (2011).
29. Леунг, Бови (H.W. Leung and Bovy Jo), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **489**, 2079 (2019).
30. Ломбард, Коен (F. Lombard and C. Koen), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **263**, 309 (1993).

31. Маски и др. (F.J. Masci, R.R. Laher, B. Rusholme, D.L. Shupe, S. Groom, J. Surace, E. Jackson, S. Monkewitz, et al.), Publ. Astron. Soc. Pacif. **131**:018003 (2019).
32. Миллер, Вахман (W.J. Miller and A.A. Wachmann), Astron. J. **63**, 309 (1958а).
33. Миллер, Вахман (W.J. Miller and A.A. Wachmann), Ricerche Astron. **6**, 109 (1958б).
34. Пойманский (G. Pojmanski), Acta Astron. **52**, 397 (2002).
35. Рейс и др. (A.G. Reiss, S. Casertano, W. Yuan, L. Macri, B. Bucciarelli, M.G. Lattanzi, J.W. MacKenty, and J.B. Bowers), Astrophys. J. **861**:126 (13pp).
36. Сковрон и др. (D.M. Skowron, J. Skowron, P. Mroz, A. Udalski, P. Pietrukowicz, I. Soszynski, M.K. Szymanski, and R. Poleski), Acta Astron. **69**, 305 (2019).
37. Тэрнер и др. (D.G. Turner, M. Abdel-Sabour Abdel-Latif, and L.N. Berdnikov), Publ. Astron. Soc. Pacific **118**, 410 (2006).
38. Тэрнер и Бердников (D.G. Turner, and L.N. Berdnikov), Astron. Astrophys. **423**, 335 (2004).
39. Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. **40**, 341 (2014) [Yu.A. Fadeyev, Sov. Astron. Lett. **40**, 301 (2014)].
40. Ферни (J.D. Fernie), Publ. Astron. Soc. Pacific **102**, 905 (1990).
41. Харрис (H.C. Harris), University of Washington, 1980, P. 133–154 (1980).
42. Харрис (H.C. Harris), Astron. J. **86**, 1192 (1981а).
43. Харрис (H.C. Harris), Astron. J. **86**, 707 (1981б).
44. Харрис, Кантерна (H.C. Harris, and R. Canterna), Astron. J. **84**, 1750 (1979).
45. Шмидт и др. (E.G. Schmidt, D. Johnston, S. Langan, and K.M. Lee), Astron. J. **128**, 1748 (2004а).
46. Шмидт и др. (E.G. Schmidt, D. Johnston, K.M. Lee, and S. Langan), Astron. J. **128**, 2988 (2004б).
47. Шонрих (R. Schoenrich, P. McMillan, and L. Eyer), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **487**, 3568 (2019).
48. Ялялиева и др. (L.N. Yalyalieva, A.A. Chemel, E.V. Glushkova, A.K. Dambis, and A.D. Klinichev), Astrophys. Bull. **73**, 335 (2018).
49. Яясингхе и др. (T. Jayasinghe, K.Z. Stanek, C.S. Kochanek, B.J. Shappee, T.W.-S. Holoien, Todd A. Thompson, J.L. Prieto, Dong Subo, et al.), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **485**, 961 (2019).