ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 45, № 7, с. 499–506

ПОИСК ЭВОЛЮЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПЕРИОДОВ ЦЕФЕИД: BG Cru

© 2019 г. Л. Н. Бердников[1*], А. Ю. Князев[1,2,3], В. В. Ковтюх[4], В. В. Кравцов[1], Т. В. Мишенина[4], Е. Н. Пастухова[5], И. А. Усенко[4,6]

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

[2] Южно-Африканская астрономическая обсерватория, Кейптаун, Южная Африка

[3] Южный Африканский Большой Телескоп, Кейптаун, Южная Африка

[4] Астрономическая обсерватория Одесского национального университета, Одесса, Украина

[5] Институт астрономии РАН, Москва, Россия

[6] НИИ Николаевская астрономическая обсерватория, Николаев, Украина

Поступила в редакцию 08.05.2019 г.; после доработки 08.05.2019 г.; принята к публикации 08.05.2019 г.

Для малоамплитудной цефеиды BG Cru построена диаграмма $O-C$, охватывающая временно́й интервал 118 лет. Диаграмма $O-C$ имеет вид параболы, что позволило впервые определить квадратичные элементы изменения блеска и вычислить скорость эволюционного уменьшения периода $dP/dt = -0.0787$ (± 0.0230) с/год. Это указывает на второе пересечение полосы нестабильности. Тест на стабильность пульсаций, предложенный Ламбертом и Коэном (1993), подтвердил реальность уменьшения периода.

Ключевые слова: цефеиды, изменяемость периодов, эволюция звезд.

DOI: 10.1134/S0320010819070027

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение парабол на диаграммах $O-C$ позволяет вычислить скорости наблюдаемых эволюционных изменений периодов цефеид. Сравнение их с теоретическими скоростями, посчитанными 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.

Наш опыт показал, что, когда интервал времени, охваченный $O-C$ диаграммой, достигает столетия, более 90% изученных цефеид (во всем диапазоне встречающихся в Галактике периодов) показывают эволюционные изменения их периодов (Тэрнер и др., 2006). Поэтому при изучении изменяемости периодов цефеид следует охватить наблюдениями как можно бо́льший интервал времени.

В данной работе мы исследуем поведение пульсаций малоамплитудной цефеиды BG Cru, период изменения блеска которой составляет $3^{\mathrm{d}}.34$.

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

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).

Переменность BG Cru открыл Штромайер (1964); Стоби и Александер (1970) отнесли звезду к малоамплитудным цефеидам с периодом $3^{\mathrm{d}}.13587$. Изучением изменяемости периода занимались Сабадош (1989), Бердников и Пастухова (1994) и Бердников и др. (1997), однако, эти три работы использовали данные внутри короткого интервала времени (JD 2439000–2450000), поэтому эволюционные изменения периода обнаружить не удалось, и был сделан вывод о необходимости привлечения фотографических наблюдений, полученных на старых фотопластинках.

*Электронный адрес: berdnik@sai.msu.ru

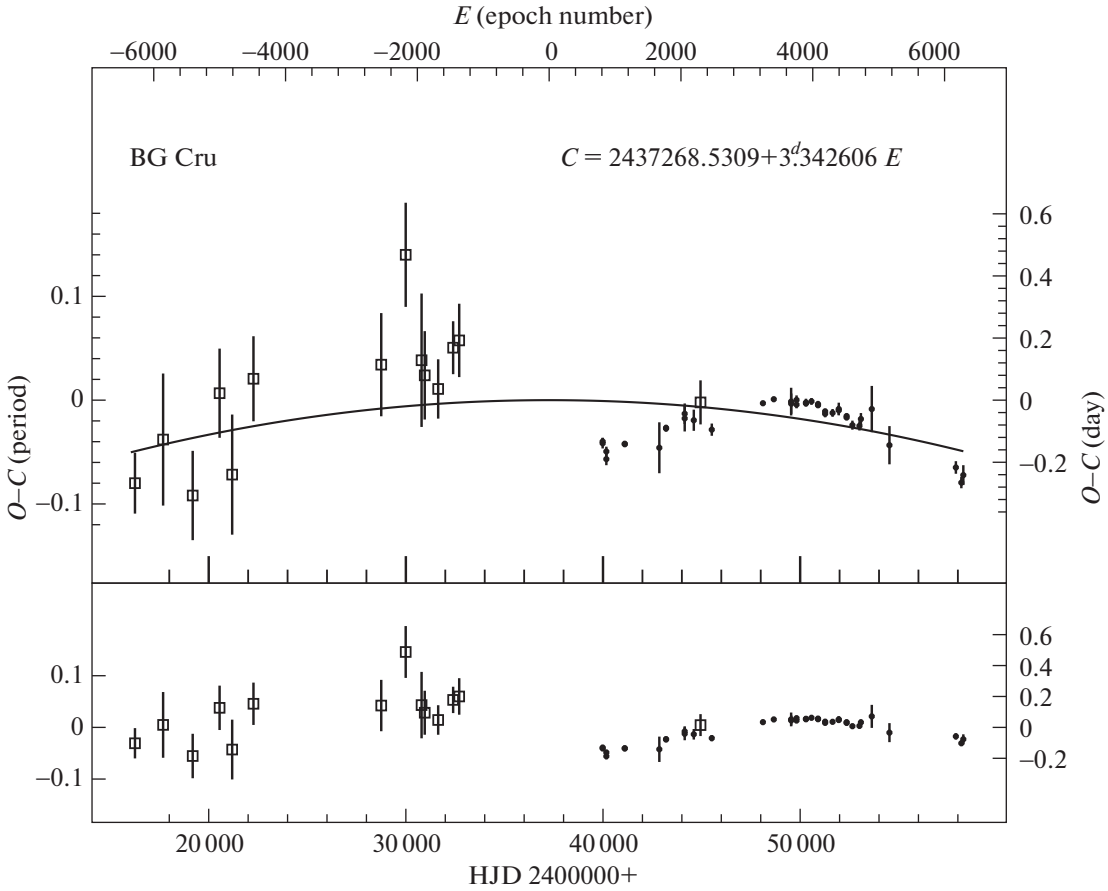

Рис. 1. *O*−*C* диаграмма для цефеиды BG Cru относительно линейных (вверху) и квадратичных (внизу) элементов (1). Линия — парабола, соответствующая элементам (1).

Для нового изучения периода BG Cru мы использовали фотографическую фотометрию с оцифрованных пластинок фототеки Гарвардского (США) университета, полученную в рамках проекта DASCH (Гриндлей и др., 2009), и новые опубликованные фотоэлектрические наблюдения, а также фотометрические данные из каталогов проектов Hipparcos (ЕКА, 1997), ASAS-3 (Пойманский, 2002) и ASAS-SN (Яясингхе и др., 2018).

Таблица 1. Наблюдательный материал цефеиды BG Cru

Источник данных	Число наблюдений	Тип наблюдений	Интервал JD
DASCH	1313	*PG*	2415110–447774
Литература	376	*B*	2439188–2452379
Литература	488	*V*	2439188–2453024
Hipparcos	179	*V*	2447868–2449042
ASAS-3	354	*V*	2452955–2455080
ASAS-SN	410	*V*	2457611–2458351

Сведения о количестве использованных наблюдений приведены в табл. 1. Самая старая фотопластинка с изображением BG Cru была получена в 1900 г., а последние ПЗС-наблюдения были сделаны в 2018 г. Следовательно, наши данные охватывают временно́й интервал 118 лет.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты обработки сезонных кривых BG Cru приведены в табл. 2. В первом и втором столбцах даны моменты максимального блеска и ошибки их определения, в третьем — тип используемых наблюдений, в четвертом и пятом — номер эпохи *E* и значение остатка *O*−*C*, а в шестом и седьмом — число наблюдений *N* и источник данных. Данные табл. 2 изображены на *O*−*C* диаграмме (рис. 1) пустыми квадратиками для гарвардских фотографических наблюдений и точками для всех

Таблица 2. Моменты максимума блеска BG Cru

Максимум, HJD	Ошибка, сут	Фильтр	E	$O-C$, сут	N	Источник данных
2416259.96030	0.09799	PG	−6285	−0.26734	99	DASCH
2417687.39354	0.21264	PG	−5858	−0.12688	99	DASCH
2419188.04346	0.14382	PG	−5409	−0.30706	98	DASCH
2420552.15615	0.14360	PG	−5001	0.02237	100	DASCH
2421190.33177	0.19340	PG	−4810	−0.23977	99	DASCH
2422270.30215	0.13697	PG	−4487	0.06887	99	DASCH
2428751.66060	0.16618	PG	−2548	0.11422	100	DASCH
2429992.12126	0.16770	PG	−2177	0.46804	86	DASCH
2430797.34981	0.21485	PG	−1936	0.12854	77	DASCH
2430957.74627	0.14230	PG	−1888	0.07991	111	DASCH
2431639.59404	0.09551	PG	−1684	0.03605	77	DASCH
2432398.49844	0.08524	PG	−1457	0.16888	129	DASCH
2432706.04169	0.11814	PG	−1365	0.19238	83	DASCH
2439982.56949	0.01220	B	812	−0.13315	9	Казинс, Лагервей (1971)
2439982.58807	0.01661	V	812	−0.13897	9	Казинс, Лагервей (1971)
2440169.72310	0.01960	V	868	−0.18988	23	Стоби, Александер (1970)
2440169.72330	0.01540	B	868	−0.16528	23	Стоби, Александер (1970)
2441102.35967	0.00776	V	1147	−0.14039	45	Казинс, Лагервей (1971)
2441105.67632	0.00805	B	1148	−0.14195	43	Казинс, Лагервей (1971)
2442857.21490	0.08200	V	1672	−0.15333	3	Берсье (2002)
2443198.19830	0.00990	B	1774	−0.09134	26	Стоби, Балона (1979)
2443198.22480	0.00980	V	1774	−0.08925	26	Стоби, Балона (1979)
2444144.20350	0.03300	B	2057	−0.04365	13	Эгген (1985)
2444144.21270	0.04200	V	2057	−0.05885	13	Эгген (1985)
2444605.46210	0.03410	B	2195	−0.06468	10	Ареллано Ферро (1981)
2444946.46540	0.07094	PG	2297	−0.00720	56	DASCH
2445517.96320	0.01970	B	2468	−0.09503	7	Берсье (2002)
2448111.93500	0.00460	V	3244	−0.00991	89	Hipparcos
2448663.47790	0.00560	V	3409	0.00299	90	Hipparcos
2449542.57560	0.04460	V	3672	−0.00469	18	Бердников, Тэрнер (1995а)
2449545.88720	0.03280	B	3673	−0.01130	15	Бердников, Тэрнер (1995а)
2449816.63520	0.01190	B	3754	−0.01439	28	Бердников, Тэрнер (1995б)
2449816.67470	0.01460	V	3754	0.00071	28	Бердников, Тэрнер (1995б)

Таблица 2. Окончание

Максимум, HJD	Ошибка, сут	Фильтр	E	$O-C$, сут	N	Источник данных
2450294.63160	0.00840	B	3897	−0.01065	14	Берсье (2002)
2450294.65890	0.01240	V	3897	−0.00775	14	Берсье (2002)
2450575.44160	0.01090	V	3981	−0.00396	24	Бердников, Тэрнер (1998)
2450906.32270	0.00840	B	4080	−0.01645	55	Бердников, Тэрнер (2000)
2450906.35090	0.01030	V	4080	−0.01265	55	Бердников, Тэрнер (2000)
2451267.30450	0.00820	B	4188	−0.03610	46	Бердников, Тэрнер (2001а)
2451267.32110	0.01140	V	4188	−0.04390	48	Бердников, Тэрнер (2001а)
2451645.03840	0.01260	V	4301	−0.04109	35	Бердников, Колдвел (2001)
2451959.22720	0.01440	B	4395	−0.03285	18	Бердников, Тэрнер (2001б)
2451959.25590	0.02040	V	4395	−0.02855	18	Бердников, Тэрнер (2001б)
2452356.97890	0.00630	B	4514	−0.05127	69	Бердников, Тэрнер (2004а)
2452356.99860	0.00790	V	4514	−0.05597	69	Бердников, Тэрнер (2004а)
2452651.12340	0.01460	V	4602	−0.08050	32	Бердников, Тэрнер (2004б)
2453008.78000	0.01500	V	4709	−0.08275	28	Бердников, Тэрнер (2004в)
2453082.33936	0.01923	V	4731	−0.06072	190	ASAS-3
2453633.90142	0.07449	V	4896	−0.02865	126	ASAS-3
2454529.60340	0.06153	V	5164	−0.14509	38	ASAS-3
2457898.87859	0.02026	V	6172	−0.21678	149	ASAS-SN
2458176.26603	0.01807	V	6255	−0.26564	166	ASAS-SN
2458276.56843	0.03199	V	6285	−0.24142	95	ASAS-SN

остальных наблюдений с вертикальными черточками, указывающими пределы ошибок определения остатков $O-C$.

На рис. 1 заметны волнообразные колебания с цикличностью около 20 000 дней. Подобные колебания были обнаружены давно (Луизе, 1903) и наблюдаются на $O-C$ диаграммах многих цефеид, но природа их до сих пор не изучена (Тэрнер, Бердников, 2004; Тэрнер и др., 2006). BG Cru является спектрально-двойной (Сабадош, 1989), но орбитальный период оценивается в 5365 дней (Галлен, 2019), так что двойственность не является причиной этих цикличных изменений.

Несмотря на то что циклические колебания остатков $O-C$ доминируют на рис. 1, парабола тоже заметна. Поэтому по всем моментам максимального блеска из табл. 2 были вычислены квадратичные элементы изменения блеска цефеиды BG Cru:

$$\begin{aligned} \text{Max HJD} = 2437268.5309\ (\pm 0.0229) + \\ + 3^{\mathrm{d}}.342606031 (\pm 0.0000040)\ E - \\ - 0.416667\ 10^{-8}\ (\pm 0.122\ 10^{-8})\ E^2, \end{aligned} \quad (1)$$

линейная часть которых использована для вычислений остатков $O-C$ в пятом столбце табл. 2. Элементы (1) использовались для проведения па-

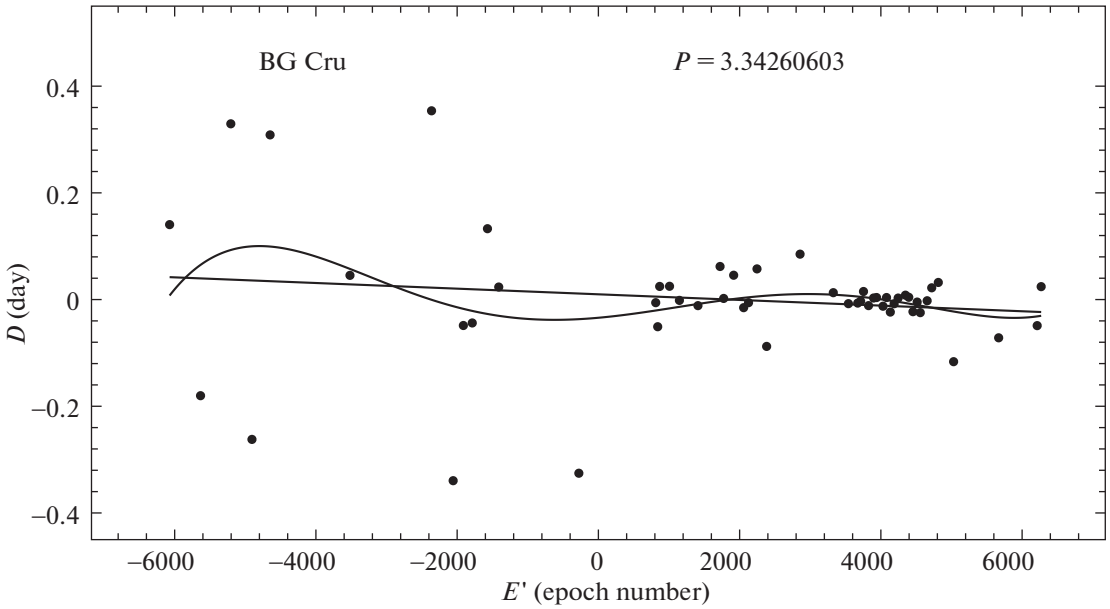

Рис. 2. Зависимость разности D_i последовательных остатков $O{-}C$ из табл. 2: $D_i = (O{-}C)_{i+1}{-}(O{-}C)_i$ от $E'_i = (E_i + E_{i+1})/2$. Прямая линия подтверждает уменьшение периода со временем, а кривая (аппроксимация многочленом пятой степени) — двойную волну, доминирующую на $O{-}C$ диаграмме (рис. 1).

раболы на верхней части рис. 1, на нижней части которого показаны отклонения от этой параболы.

По фотоэлектрическим наблюдениям было найдено, что максимумы в фильтре B наступают раньше, чем в фильтре V, на $0^{\mathrm{d}}.0244$. Эта поправка учитывалась 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 Ламбертом и Коэном (1993). Для этого также, как и ранее (Бердников и др., 2000), мы вычислили разности D_i последовательных остатков $O{-}C$ из табл. 2: $D_i = (O{-}C)_{i+1} - (O{-}C)_i$ и построили график зависимости D_i от $E'_i = (E_i + E_{i+1})/2$ (рис. 2). Разности D_i, которые имеют смысл отличий истинного периода от среднего периода в интервале эпох $E_i{-}E_{i+1}$, показывают уверенное уменьшение периода со временем (прямая линия); кроме того, на рис. 2 заметна и двойная волна (аппроксимация многочленом пятой степени), доминирующая на $O{-}C$ диаграмме (рис. 1).

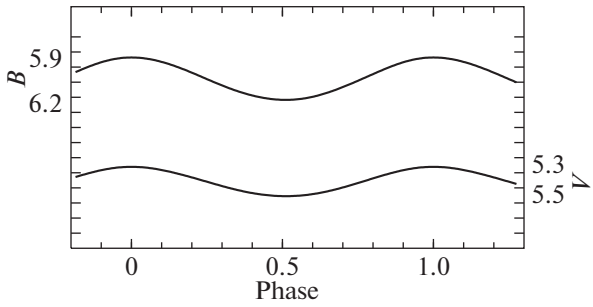

Рис. 3. Стандартные кривые цефеиды BG Cru в фильтрах B и V.

Квадратичный член элементов (1) дает возможность вычислить скорость эволюционного уменьшения периода $dP/dt = -0.0787$ (± 0.0230) с/год, что согласуется с результатами модельных расчетов для второго пересечения полосы нестабильности (Тэрнер и др., 2006; Фадеев, 2014).

Следует отметить, 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 BG Cru для фаз от 0 до 0.995 с шагом 0.005 в системе BV; эти стандартные кривые, графически изображенные на рис. 3, построены по фотоэлектрическим наблюдениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения изменяемости периода BG Cru нами использованы 1313 фотографических оценок блеска, полученных в рамках проекта DASCH (Гриндлей и др., 2009) в Гарвардском (США) университете; кроме того, были собраны все опубликованные фотометрические наблюдения, включая данные из каталогов проектов Hipparcos

Таблица 3. Стандартные кривые блеска BG Cru в системе *B* и *V*

Фаза	*B*	*V*	Фаза	*B*	*V*	Фаза	*B*	*V*	Фаза	*B*	*V*
0.000	5.936	5.361	0.250	6.080	5.459	0.500	6.217	5.555	0.750	6.091	5.468
0.005	5.937	5.361	0.255	6.084	5.462	0.505	6.217	5.555	0.755	6.086	5.465
0.010	5.937	5.361	0.260	6.088	5.465	0.510	6.217	5.555	0.760	6.082	5.462
0.015	5.937	5.361	0.265	6.092	5.468	0.515	6.217	5.555	0.765	6.077	5.459
0.020	5.938	5.362	0.270	6.097	5.471	0.520	6.217	5.555	0.770	6.073	5.456
0.025	5.938	5.362	0.275	6.101	5.474	0.525	6.217	5.555	0.775	6.069	5.453
0.030	5.939	5.363	0.280	6.105	5.477	0.530	6.216	5.554	0.780	6.064	5.450
0.035	5.940	5.363	0.285	6.109	5.479	0.535	6.216	5.554	0.785	6.060	5.447
0.040	5.941	5.364	0.290	6.113	5.482	0.540	6.215	5.553	0.790	6.055	5.443
0.045	5.943	5.365	0.295	6.117	5.485	0.545	6.214	5.553	0.795	6.051	5.440
0.050	5.944	5.366	0.300	6.121	5.488	0.550	6.213	5.552	0.800	6.047	5.437
0.055	5.946	5.367	0.305	6.125	5.491	0.555	6.212	5.552	0.805	6.042	5.434
0.060	5.947	5.369	0.310	6.129	5.493	0.560	6.211	5.551	0.810	6.038	5.431
0.065	5.949	5.370	0.315	6.133	5.496	0.565	6.210	5.550	0.815	6.033	5.428
0.070	5.951	5.371	0.320	6.137	5.499	0.570	6.208	5.549	0.820	6.029	5.425
0.075	5.953	5.373	0.325	6.141	5.501	0.575	6.207	5.548	0.825	6.025	5.422
0.080	5.955	5.374	0.330	6.144	5.504	0.580	6.205	5.547	0.830	6.021	5.419
0.085	5.958	5.376	0.335	6.148	5.506	0.585	6.203	5.546	0.835	6.016	5.416
0.090	5.960	5.378	0.340	6.152	5.509	0.590	6.201	5.544	0.840	6.012	5.413
0.095	5.963	5.380	0.345	6.155	5.511	0.595	6.199	5.543	0.845	6.008	5.411
0.100	5.966	5.382	0.350	6.158	5.514	0.600	6.197	5.541	0.850	6.004	5.408
0.105	5.968	5.384	0.355	6.162	5.516	0.605	6.195	5.540	0.855	6.000	5.405
0.110	5.971	5.386	0.360	6.165	5.518	0.610	6.192	5.538	0.860	5.996	5.402
0.115	5.974	5.388	0.365	6.168	5.520	0.615	6.190	5.537	0.865	5.992	5.400
0.120	5.977	5.390	0.370	6.171	5.523	0.620	6.187	5.535	0.870	5.989	5.397
0.125	5.980	5.392	0.375	6.174	5.525	0.625	6.184	5.533	0.875	5.985	5.395
0.130	5.984	5.394	0.380	6.177	5.527	0.630	6.181	5.531	0.880	5.981	5.392
0.135	5.987	5.397	0.385	6.180	5.529	0.635	6.178	5.529	0.885	5.978	5.390
0.140	5.990	5.399	0.390	6.183	5.531	0.640	6.175	5.527	0.890	5.975	5.387
0.145	5.994	5.402	0.395	6.185	5.533	0.645	6.172	5.525	0.895	5.971	5.385
0.150	5.998	5.404	0.400	6.188	5.534	0.650	6.169	5.523	0.900	5.968	5.383
0.155	6.001	5.407	0.405	6.190	5.536	0.655	6.166	5.520	0.905	5.965	5.381
0.160	6.005	5.409	0.410	6.193	5.538	0.660	6.162	5.518	0.910	5.962	5.379

Таблица 3. Окончание

Фаза	*B*	*V*	Фаза	*B*	*V*	Фаза	*B*	*V*	Фаза	*B*	*V*
0.165	6.009	5.412	0.415	6.195	5.539	0.665	6.159	5.516	0.915	5.960	5.377
0.170	6.013	5.414	0.420	6.197	5.541	0.670	6.155	5.513	0.920	5.957	5.375
0.175	6.016	5.417	0.425	6.199	5.542	0.675	6.152	5.511	0.925	5.955	5.374
0.180	6.020	5.420	0.430	6.201	5.544	0.680	6.148	5.508	0.930	5.952	5.372
0.185	6.024	5.422	0.435	6.203	5.545	0.685	6.144	5.506	0.935	5.950	5.370
0.190	6.029	5.425	0.440	6.205	5.546	0.690	6.140	5.503	0.940	5.948	5.369
0.195	6.033	5.428	0.445	6.206	5.547	0.695	6.136	5.500	0.945	5.946	5.368
0.200	6.037	5.431	0.450	6.208	5.548	0.700	6.132	5.497	0.950	5.945	5.366
0.205	6.041	5.433	0.455	6.209	5.549	0.705	6.128	5.495	0.955	5.943	5.365
0.210	6.045	5.436	0.460	6.211	5.550	0.710	6.124	5.492	0.960	5.942	5.364
0.215	6.049	5.439	0.465	6.212	5.551	0.715	6.120	5.489	0.965	5.940	5.364
0.220	6.054	5.442	0.470	6.213	5.552	0.720	6.116	5.486	0.970	5.939	5.363
0.225	6.058	5.445	0.475	6.214	5.553	0.725	6.112	5.483	0.975	5.938	5.362
0.230	6.062	5.448	0.480	6.215	5.553	0.730	6.108	5.480	0.980	5.938	5.362
0.235	6.067	5.451	0.485	6.215	5.554	0.735	6.104	5.477	0.985	5.937	5.361
0.240	6.071	5.454	0.490	6.216	5.554	0.740	6.099	5.474	0.990	5.937	5.361
0.245	6.075	5.456	0.495	6.217	5.554	0.745	6.095	5.471	0.995	5.937	5.361

(ЕКА, 1997), ASAS-3 (Пойманский, 2002) и ASAS-SN (Яясингхе и др., 2018). Все имеющиеся данные были обработаны методом Герцшпрунга (1919), и были определены 53 момента максимального блеска, которые использовались для построения $O-C$ диаграммы, охватывающей временнóй интервал 118 лет. Это позволило впервые определить квадратичные элементы изменения блеска (1) и вычислить скорость эволюционного уменьшения периода $dP/dt = -0.0787$ (± 0.0230) с/год, что указывает на второе пересечения полосы нестабильности (Тэрнер и др., 2006; Фадеев, 2014). Тест на стабильность пульсаций, предложенный Ламбертом и Коэном (1993), подтвердил реальность уменьшения периода.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 18-02-00890 и 19-02-00611).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ареллано Ферро (A. Arellano Ferro), Publ. Astron. Soc. Pacif. **93**, 351 (1981).
2. Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. **18**, 519 (1992) [L.N. Berdnikov, Sov. Astron. Lett. **18**, 207 (1992)].
3. Бердников, Колдвел (L.N. Berdnikov and J.A.R. Caldwell), J. Astron. Data **7**, № 3 (2001).
4. Бердников Л.Н., Игнатова В.В., Пастухова Е.Н., Тэрнер Д.Г., Письма в Астрон. журн. **23**, 204 (1997) [L.N. Berdnikov., V.V. Ignatova, E.N. Pastukhova, D.G. Turner, Astron. Lett. **23**, 177 (1997)].
5. Бердников и др. (L.N. Berdnikov., V.V. Ignatova, J.A.R. Caldwell, C. Koen), New Astron. **4**, 625 (2000).
6. Бердников Л.Н., Пастухова Е.Н., Письма в Астрон. журн. **20**, 829 (1994) [L.N. Berdnikov., E.N. Pastukhova, Astron. Lett. **20**, 720 (1994)].
7. Бердников, Тэрнер (L.N. Berdnikov and D.G. Turner), Astron. Astrophys. Trans. **16**, 291 (1998).
8. Бердников, Тэрнер (L.N. Berdnikov and D.G. Turner), Astron. Astrophys. Trans. **18**, 657 (2000).
9. Бердников, Тэрнер (L.N. Berdnikov and D.G. Turner), Astron. Astrophys. Trans. **19**, 689 (2001a).

10. Бердников, Тэрнер (L.N. Berdnikov and D.G. Turner), Astrophys. J. Suppl. Ser. **137**, 209 (2001б).
11. Бердников, Тэрнер (L.N. Berdnikov and D.G. Turner), Astron. Astrophys. Trans. **23**, 253 (2004a).
12. Бердников, Тэрнер (L.N. Berdnikov and D.G. Turner), Astron. Astrophys. Trans. **23**, 395 (2004b).
13. Бердников, Тэрнер (L.N. Berdnikov and D.G. Turner), Astron. Astrophys. Trans. **23**, 599 (2004c).
14. Берсье (D. Bersier), Astrophys. J. Suppl. Ser. **140**, 465 (2002).
15. Галлен и др. (A. Gallenne, P. Kervella, S. Borgniet, A. Mérand, G. Pietrzynski, W. Gieren, J.D. Monnier, G.H. Schaefer, et al.), Astron. Astrophys. **622**, 164 (2019).
16. Герцшпрунг (E. Hertzsprung), Astron. Nachr. **210**, 17 (1919).
17. Гриндлей и др. (J. Grindlay, Sumin Tang, E. Los, M. Servilla), ASP Conf. Ser. **410**, 101 (2009).
18. Эгген (O.J. Eggen), Astron. J. **90**, 1297 (1985).
19. EKA (ESA), The Hipparcos and Tycho catalogues, ESA SP-1200 (Noordwijk: ESA, 1997).
20. Казинс, Лагервей (A.W.J. Cousins and H.C. Lagerwey), Mon. Not. Astron. Soc. South. Afr. **30**, 146 (1971).
21. Ломбард, Коэн (F. Lombard and C. Koen), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **263**, 309 (1993).
22. Луизе (M. Luizet), Astron. Nachr. **163**, 355 (1903).
23. Поймански (G. Pojmanski), Acta Astron. **52**, 397 (2002).
24. Сабадош (L. Szabados), Mitt. Sternw. Ung. Akad. Wiss. Nr. **94**, 3 (1989).
25. Стоби, Александер (R.S. Stobie and J.B. Alexander), Observatory **90**, 66 (1970).
26. Стоби, Балона (R.S. Stobie and L.A. Balona), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **189**, 641 (1979).
27. Тэрнер и др. (D.G. Turner, M. Abdel-Sabour Abdel-Latif, L.N. Berdnikov), Publ. Astron. Soc. **118**, 410 (2006).
28. Тэрнер, Бердников (D.G. Turner and L.N. Berdnikov), Astron. Astrophys. **423**, 335 (2004).
29. Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. **40**, 341 (2014) [Yu.A. Fadeyev, Astron. Lett. **40**, 301 (2014)].
30. Яясингхе и др. (T. Jayasinghe, K.Z. Stanek, C.S. Kochanek, B.J. Shappee, T.W.-S. Holoien, Todd A. Thompson, J.L. Prieto, Subo Dong, et al.), 2018arXiv180907329 (2018).