

DOI: 10.54503/0571-7132-2023.66.2-233

ASASSN-19fy: ОСОБЕННОСТИ КАРЛИКОВОЙ НОВОЙ В "ПРОВАЛЕ" ПЕРИОДОВ

О.И.АНТОНЮК¹, Е.П.ПАВЛЕНКО¹, К.А.АНТОНЮК^{1,2}, Н.В.ПИТЬ¹,
А.А.СОСНОВСКИЙ¹, Г.И.КОХИРОВА³, Ф.Дж.РАХМАТУЛЛАЕВА³

Поступила 10 марта 2023

Фотометрические исследования карликовой новой в "провале" периодов ASASSN-19fy были проведены в 2020-2021гг. в течение 24 ночей в Крымской астрофизической обсерватории РАН и трех ночей в Международной астрономической обсерватории Санглох Института астрофизики НАН Республики Таджикистан. Наблюдения охватили сверхвспышку, два повторных поярчания и медленное возвращение к довспышечному состоянию. В течение этого времени наблюдались сверхгорбы, в эволюции которых были выделены стадии развитых сверхгорбов "В", их затухания "С" и переход между ними. Средний период сверхгорбов на стадии "В" составил 0.09278(13) сут, найдено его увеличение в течение этой стадии со скоростью $(dP/dT)/P = 10 \cdot 10^{-5}$. На стадии "С" период сверхгорбов был равен 0.092289(15) сут. Показано, что ASASSN-19fy является двенадцатым объектом, пополнившим группу долгопериодических карликовых новых, имеющих сходство со звездами типа WZ Sge.

Ключевые слова: *звезды: карликовые новые: вспышки: сверхгорбы: ASASSN-19fy*

1. *Введение.* ASASSN (All-Sky Automated Survey for Supernova) [1] регулярно сообщает о различных вспыхнувших объектах, среди которых попадают и тесные двойные системы на поздней стадии эволюции - катаклизмические переменные различных типов [2], в том числе карликовые новые типа SU UMa с орбитальными периодами от 76 мин до 3 ч 18 мин. В таких системах вещество со звезды-донора - звезды позднего спектрального класса, заполнившей свою полость Роша, перетекает на соседний белый карлик через внутреннюю точку Лагранжа, образуя вокруг последнего аккреционный диск. Долгопериодическая граница области определения звезд типа SU UMa включает в себя так называемый "провал" (или "пробел") в распределении орбитальных периодов (2.15-3.18 ч), а короткопериодическая граница характеризуется большим числом систем подтипа WZ Sge [3]. Провал в распределении периодов содержит существенный дефицит карликовых новых. Согласно стандартной теории эволюции [3], в этом интервале периодов звезды не должны вспыхивать, поскольку на этом этапе жизни они уходят под полость Роша и аккреция на белый карлик прекращается. Тот факт, что в реальности относительно небольшое количество карликовых новых все же попадает в "провал", объясняют тем, что эти объекты или "родились" как

катаклизмические с периодами внутри него [4], или их компоненты-доноры обладали пониженной металличностью [5,6].

Карликовые новые типа SU UMa уникальны тем, что демонстрируют два типа вспышек: "обычные" и "сверхвспышки", которые ярче и продолжительнее, чем обычные [2]. Во время сверхвспышек наблюдаются так называемые "сверхгорбы" - колебания яркости, период которых на несколько процентов превосходит орбитальный. Они появляются у карликовых новых типа SU UMa в прецессирующем эллиптическом диске вследствие возникновения в нем приливного 3:1 резонанса между вращением в аккреционном диске и орбитальным периодом [7,8], у которых отношение масс донора m_2 к белому карлику m_1 удовлетворяет условию $m_2/m_1 < 0.25$ [7,9,10]. Периоды сверхгорбов эволюционируют [11]: они максимальны и постоянны на стадии их роста "А", изменяются на стадии "В" и минимальны и постоянны на стадии "С". Длительность этих стадий различна у короткопериодических и долгопериодических систем. Кроме этого, у звезд типа WZ Sge редко наблюдается ярко выраженная стадия "С" [12]. Теоретически орбитальные периоды систем, аккреционные диски которых могут оказаться на границе 3:1 резонанса (т.е., предела приливной неустойчивости), должны находиться вблизи долгопериодической границы "провала" периодов. Наблюдения действительно показывают монотонное убывание числа известных карликовых новых типа SU UMa по мере приближения к этой границе [13,14]. Известно также, что некоторые системы в "провале" (например, NY Ser и V1006 Cyg [13]) иногда демонстрируют долго длящиеся вспышки, напоминающие сверхвспышки, но без регистрируемых сверхгорбов, т.е., резонанс 3:1 в таких вспышках не был достигнут. Из-за малого числа карликовых новых в "провале" периодов и, тем более, выше него, их свойства плохо изучены.

По данным ASAS-SN яркая вспышка ASASSN-19fu впервые была зарегистрирована 20 апреля 2014г. и составляла $V=13^m.9$. В марте 2019г. вновь было замечено поярчение (ребрайтинг) этого объекта: 9 марта его блеск составлял $g=14^m.9$, до этого он оценивался как $g=19^m.6$ [15]. Следующая зафиксированная вспышка произошла уже 5 августа 2020г., когда объект достиг $14^m.14$ [16]. Дальнейшие наблюдения подтвердили предположения о возможной природе этого объекта как карликовой новой типа SU UMa. Его блеск через неделю после начала вспышки составил $14^m.2$, были отмечены сверхгорбы с амплитудой $0^m.27$ и периодом 0.0889 ± 0.0033 сут [17]. Этот период был позже уточнен по более длительным наблюдениям и составил $0.09277(5)$ сут [18]. Ослабевать вспышка начала 15 августа, а уже 20 августа произошло первое [19], а затем второе [20] повторное поярчение.

2. *Наблюдения.* Фотометрические наблюдения карликовой новой

ASASSN-19fy проводились с августа по октябрь 2020г. и в июне 2021г. на телескопах Крымской Астрофизической обсерватории К-380 (0.38 м, ПЗС Apogee E47), АЗТ-11 (1.25 м, ПЗС FLI PL230 Proline), ЗТШ (2.6 м, ПЗС Apogee E47) и на телескопе Цейсс-1000 обсерватории Санглох (1.00 м, ПЗС FLI 16803 Proline). Использовалось несколько звезд сравнения: USNO-B1.0 1417-0314989, имеющая $R=13^m.81$, для яркого состояния объекта; USNO-B1.0 1417-0314938, $R=15^m.77$, когда объект находился в спокойном состоянии. Экспозиция подбиралась такой длительности, чтобы точность единичной оценки блеска была не хуже $0^m.01 - 0^m.02$ во время вспышек и не хуже $0^m.05$ в ходе возвращения системы в спокойное состояние. Сводка о данных приведена в табл.1. Наблюдения охватили несколько стадий вспышечной

Таблица 1

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

Дата - JD 2400000+...	Телескоп	Полоса	Кол. оценок блеска	Стадии вспышечной активности
11.08.2020 - 59073	К-380	w	240	сверхвспышка
12.08.2020 - 59074	К-380	w	395	сверхвспышка
12.08.2020 - 59074	АЗТ-11	V, Ic	133	сверхвспышка
13.08.2020 - 59075	К-380	w	807	сверхвспышка
13.08.2020 - 59075	АЗТ-11	V, Ic	133	сверхвспышка
13.08.2020 - 59075	Цейсс-1000	V, Rc, Ic	8	сверхвспышка
14.08.2020 - 59076	К-380	w	602	сверхвспышка
14.08.2020 - 59076	Цейсс-1000	V, Rc, Ic	25	сверхвспышка
15.08.2020 - 59077	К-380	w	150	сверхвспышка
15.08.2020 - 59077	Цейсс-1000	V, Rc, Ic	28	сверхвспышка
16.08.2020 - 59078	К-380	w	72	сверхвспышка
17.08.2020 - 59079	К-380	w	61	сверхвспышка
18.08.2020 - 59080	К-380	w	65	повторное поярчание (1)
19.08.2020 - 59081	АЗТ-11	w	57	повторное поярчание (1)
21.08.2020 - 59083	АЗТ-11	w	30	повторное поярчание (1)
23.08.2020 - 59085	АЗТ-11	w	39	повторное поярчание (1)
24.08.2020 - 59086	АЗТ-11	w	30	повторное поярчание (1)
25.08.2020 - 59087	АЗТ-11	w	20	повторное поярчание (2)
26.08.2020 - 59088	АЗТ-11	w	17	повторное поярчание (2)
27.08.2020 - 59089	АЗТ-11	w	54	повторное поярчание (2)
28.08.2020 - 59090	АЗТ-11	w	26	повторное поярчание (2)
29.08.2020 - 59091	АЗТ-11	w	43	повторное поярчание (2)
08.09.2020 - 59101	АЗТ-11	w	50	затухание сверхвспышки
09.09.2020 - 59102	АЗТ-11	w	46	затухание сверхвспышки
09.09.2020 - 59102	ЗТШ	w	374	затухание сверхвспышки
10.09.2020 - 59103	ЗТШ	w	387	затухание сверхвспышки
11.09.2020 - 59104	АЗТ-11	w	55	затухание сверхвспышки
14.09.2020 - 59107	АЗТ-11	w	79	затухание сверхвспышки
13.10.2020 - 59136	ЗТШ	w	189	затухание сверхвспышки
07.06.2021 - 59373	ЗТШ	w	289	спокойное состояние

активности этой системы: часть сверхвспышки, два повторных поярчания блеска и спокойное состояние блеска. Преимущественно наблюдения проводились в интегральном свете ("w") с максимумом чувствительности, близким к системе Кузинса R_c , но в некоторые даты во время сверхвспышки были выполнены измерения в полосах Джонсона-Кузинса V , R_c , I_c . В целом наблюдения охватили 24 ночи в КрАО и три ночи на Санглохе. Также использовались доступные данные других наблюдателей этой системы из сети AAVSO (American Association of Variable Star Observers, <https://www.aavso.org>).

3. Кривые блеска.

3.1. *Долговременная кривая блеска.* Полная кривая блеска системы ASASSN-19fu, полученная в 2020 и 2021гг., включающая разные стадии вспышечной активности, представлена на рис.1. Кривая блеска демонстрирует часть сверхвспышки, два поярчания и медленное затухание сверхвспышки. Для построения кривой использовались данные, полученные в процессе наших наблюдений, а также из открытой сети наблюдателей AAVSO.

Сверхвспышка до наступления поярчаний длилась около 12 сут (JD 2459067-2459079), наши наблюдения пришлись на вторую половину плато сверхвспышки. Максимальный блеск объекта в августе 2020г. достиг $\sim 14^m$, ослабление на стадии плато происходило со скоростью $0^m.13/\text{сут}$.

Через двое суток после завершения плато сверхвспышки и быстрого затухания до $\sim 17^m$ произошло повторное поярчание системы. Всего в интервале

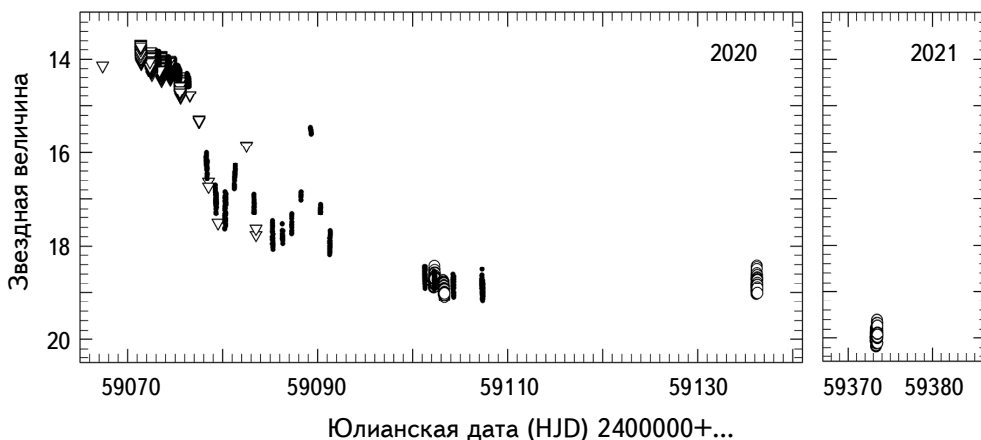


Рис.1. Общая кривая блеска ASASSN-19fu за 2020 и 2021гг. Открытыми треугольниками показаны данные из сети AAVSO (фотометрическая система, близкая к V), заполненными кружками - наблюдения на телескопах К-380 и АЗТ-11 ("w"), открытыми большими кружками - наблюдения на телескопе ЗТШ ("w").

JD 2459080-2459091 нами зарегистрированы два таких события, каждое из которых длилось около четырех суток и имело амплитуду около $2^m.5$. Профиль как первого, так и второго поярчания представлял более пологую восходящую ветвь по сравнению с нисходящей, что соответствовало развитию вспышки "изнутри вовне" [21]. В предположении, что частота потенциально возможных последующих поярчаний была бы такой, как и предыдущих, такое событие могло бы случиться в интервале JD 2459091-2459101, где наблюдения отсутствовали. На кривой блеска видно, что поярчания накладывались на медленное ослабевание блеска карликовой новой, имевшее скорость, сопоставимую со скоростью ослабления блеска в течение плато сверхвспышки. В интервале JD 2459101-2459108 (т.е., спустя ~ 30 сут после окончания основной вспышки), ASASSN-19fu все еще не достиг довыспышечного уровня блеска, хотя и был близок к нему. В ночь JD 2459136 блеск объекта колебался в пределах $\sim 19^m.6$ - $20^m.1$, это уже соответствовало спокойному состоянию. Отсюда можно заключить, что амплитуда вспышки составила шесть звездных величин.

3.2. Индивидуальные кривые блеска и цвета во время сверхвспышки и на стадии поярчаний. На рис.2 приведены кривые блеска для 4 ночей, во время которых хорошо видны сверхгорбы. Эти наблюдения относятся к окончанию стадии плато сверхвспышки (стадии "В"). За исключением первой ночи (JD 2459073), сверхгорбы имеют асимметричный профиль с явным или возможным вторым горбом за период. Для ночи JD 2459073 профиль сверхгорба имеет почти симметричный первый горб и практически полное отсутствие второго горба. Амплитуда сверхгорбов составляла в среднем $0^m.25$.

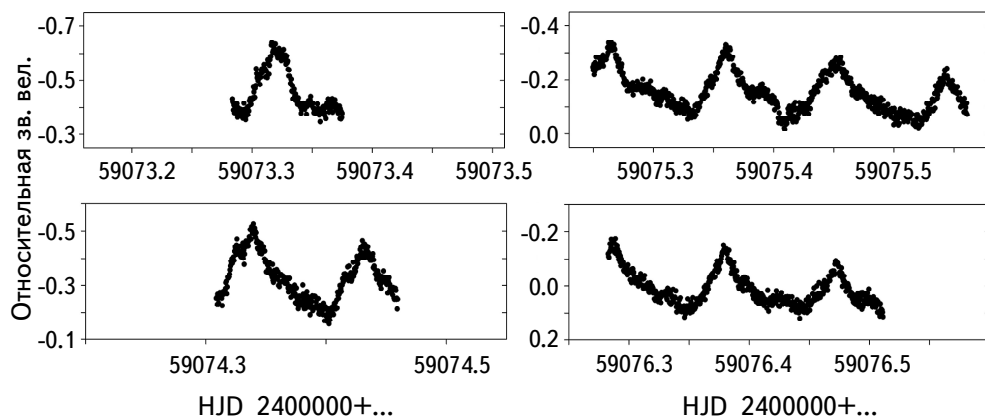


Рис.2. Индивидуальные кривые блеска сверхгорбов ASASSN-19fu во время сверхвспышки в 2020г. Использовалась звезда сравнения USNO-B1.0 1417-0314989, имеющая $R = 13^m.81$.

Периодограмма для наблюдаемых сверхгорбов, полученная методом Стеллингверфа, реализованного в пакете программ ISDA [22], приведена на рис.3 (вверху). Наиболее значимый пик из серии суточно-сопряженных пиков указывает на период $0.09278(13)$ сут, таким образом, объект попадает

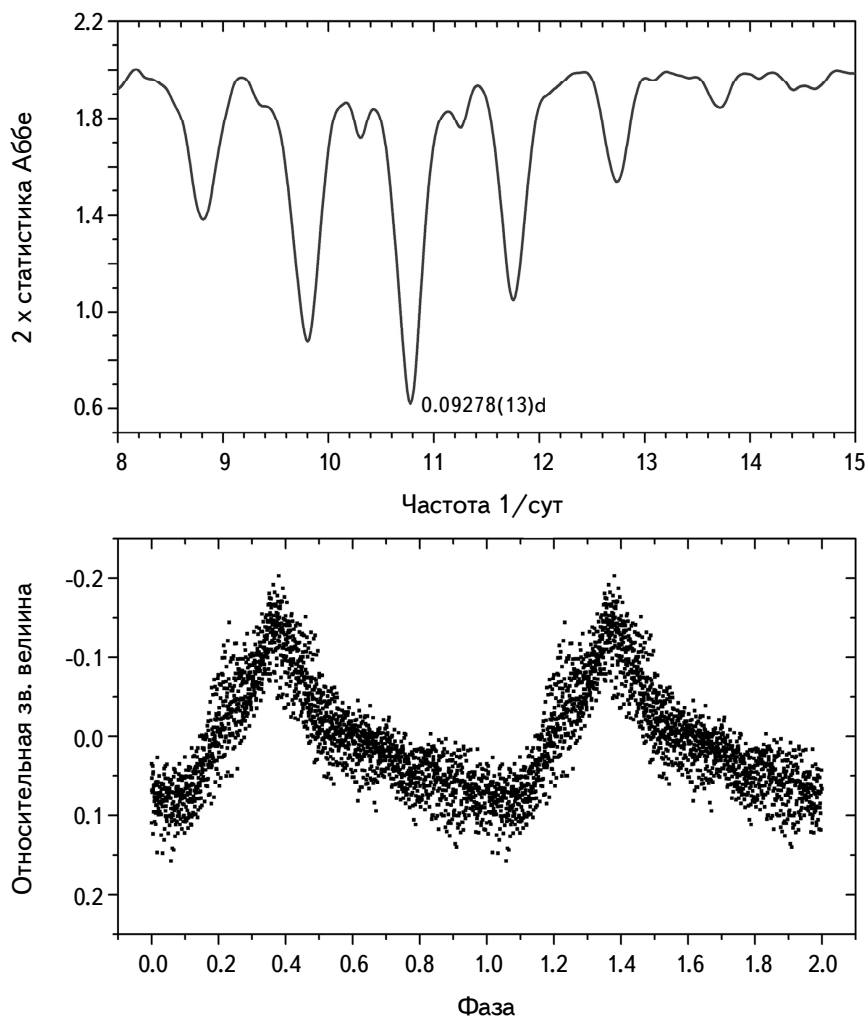


Рис.3. Периодограмма и средняя фазовая кривая ASASSN-19fu для сверхгорбов 2020г. на стадии "В". Из анализируемых данных предварительно был вычтен тренд, соответствующий профилю плато сверхвыспышки.

в "провал" периодов. На рис.3 (внизу) приведена соответствующая средняя фазовая кривая блеска.

Примеры кривых блеска и показателей цвета в наиболее далеких друг от друга полосах V и I_c приведены на рис.4. Профили кривых блеска в полосах

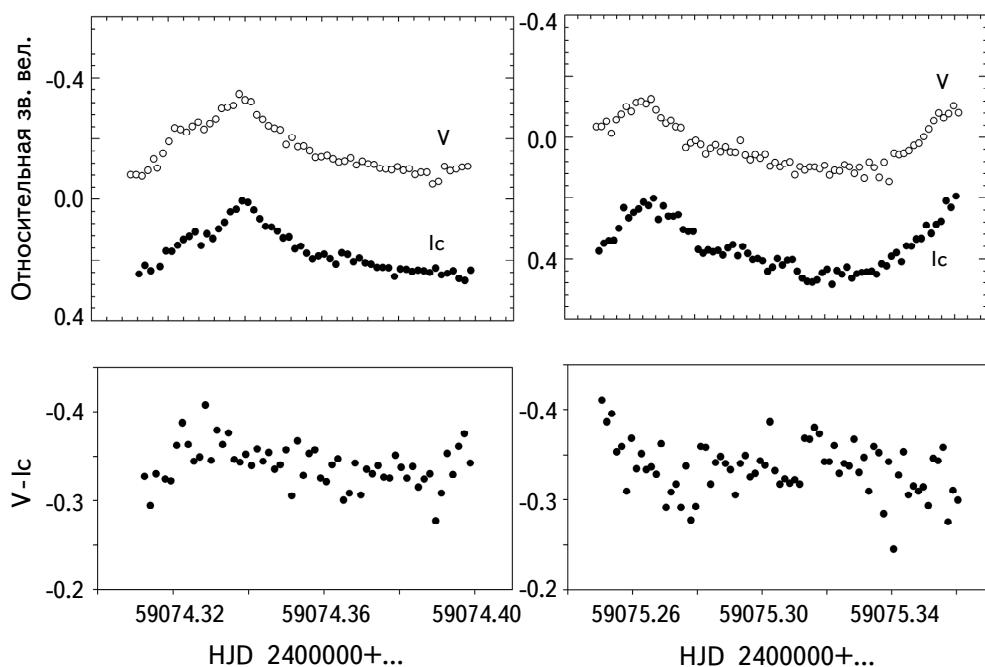


Рис.4. Пример кривых блеска в полосах V и Ic и показателей цвета $V-Ic$ (в относительных величинах) во время сверхвыспышки ASASSN-19fy. Использовалась звезда сравнения USNO-B1.0 1417-0314989, имеющая $R = 13^m.81$.

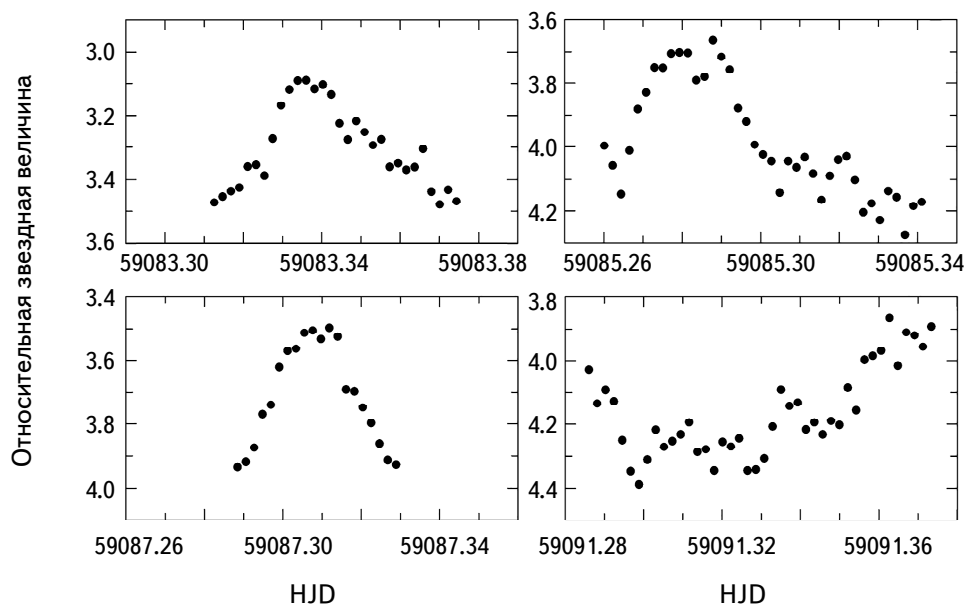


Рис.5. Пример индивидуальных кривых блеска ASASSN-19fy во время поярчаний. Использовалась звезда сравнения USNO-B1.0 1417-0314989, имеющая $R = 13^m.81$.

V и I_c достаточно хорошо повторяют друг друга, а показатель цвета $V-I_c$ не показывает значимой зависимости от блеска сверхгорба.

Сверхгорбы продолжали наблюдаться и на стадии поярчений. Амплитуда сверхгорбов уменьшалась обратно пропорционально их яркости, кривые блеска с максимальной амплитудой около $0^m.4$ приведены на рис.5.

3.3. *Индивидуальные кривые блеска на стадии медленного возвращения к довыспышечному состоянию.* Через 20 сут после завершения плато сверхвысписки наши наблюдения пришлись уже на более "спокойную" часть кривой блеска, стадию медленного ослабления вспышки без поярчений. На рис.6 показаны кривые блеска для ночей, полученных на ЗТШ в интервале девять месяцев. Кривые характеризуются ярко выраженными квази-периодическими колебаниями (QPO) с характерным временем около 25-30 мин и изменяющейся амплитудой, в отдельных случаях достигающей $0^m.2$. Эти колебания накладываются на более медленную модуляцию блеска сравнимой амплитуды и в целом затрудняют поиск орбитального периода. Наличие таких QPO подобно таким же колебаниям, зарегистрированным у другой карликовой новой в "провале" периодов - V1006 Cyg [23,24].

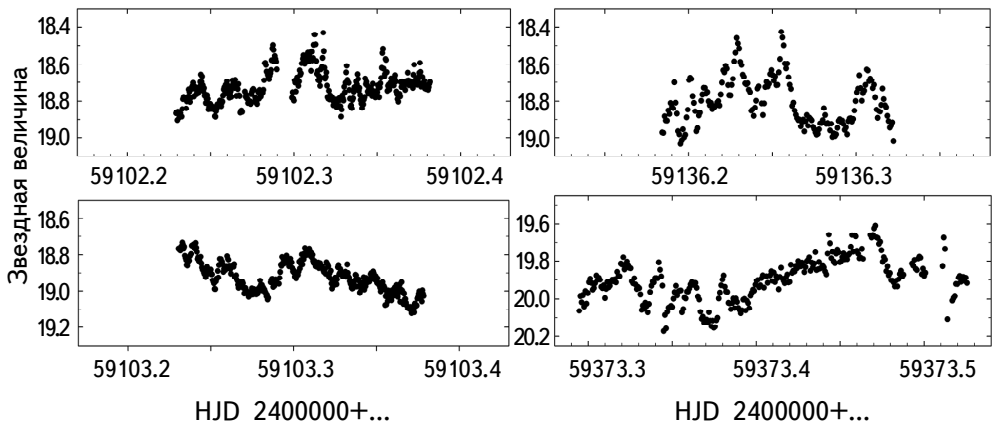


Рис.6. Кривые блеска ASASSN-19fu во вневыспышечном состоянии для 2020 и 2021гг.

4. *Эволюция периода сверхгорбов.* Мы определили моменты максимумов блеска сверхгорбов во время сверхвысписки и поярчений (табл.2), и вычислили разности О-С наблюдаемых (О) и расчетных (С) моментов, используя эфемериду

$$\text{HJD}(C) = 2459071.373 + 0.09278 \cdot E,$$

где E - номер цикла. Результат представлен на рис.7.

Таблица 2

МОМЕНТЫ МАКСИМУМОВ БЛЕСКА (HJD)

HJD (2400000+...)	O-C (сут.)	HJD (2400000+...)	O-C (сут.)	HJD (2400000+...)	O-C (сут.)
59072.3940	0.00042	59074.5240	-0.00352	59079.3620	0.0099
59072.4870	0.00064	59075.2650	-0.00476	59080.2920	0.01212
59073.3220	0.00062	59075.3600	-0.00254	59080.3820	0.00934
59073.4140	-0.00016	59075.4550	-0.00032	59081.3020	0.00154
59073.5080	0.00106	59076.2870	-0.00334	59083.3370	-0.00462
59074.3400	-0.00196	59076.3800	-0.00312	59085.2830	-0.007
59074.4320	-0.00274	59076.4750	-0.0009	59090.3460	-0.0469
59074.4330	-0.00174	59078.3400	0.0085	59091.3670	-0.04648

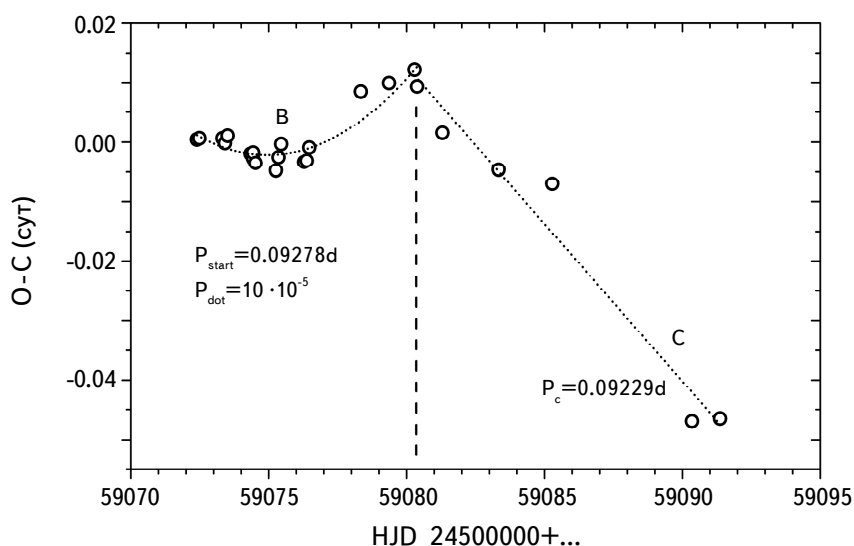


Рис.7. Зависимость O-C для максимумов сверхгорбов во время сверхвыспышки и поярчений у ASASSN-19fy. Пунктирная линия проведена через переход O-C между стадиями развития сверхгорбов "B" и "C".

Поведение O-C ясно указывает на стадии "B" и "C" в эволюции сверхгорбов и резкий переход между этими стадиями, случившийся накануне первого поярчения. Ход O-C на стадии "B" хорошо аппроксимируется параболой, соответствующей увеличению периода с производной $(dP/dT)/P = 10 \cdot 10^{-5}$. Период на стадии "C" составил 0.092289(15) сут.

5. *Обсуждение и заключение.* Представленные выше результаты показывают, что объект ASASSN-19fy, находящийся в "провале" периодов,

демонстрирует черты, свойственные как звездам типа SU UMa, включая долгопериодические карликовые новые в "провале", так и короткопериодическим карликовым новым типа WZ Sge. Мы выделили стадии "B" и "C" [11] в эволюции сверхгорбов, определили, что средний период на стадии "B" соответствовал 0.09278(13) сут и увеличивался с производной $(dP/dT)/P = 10 \cdot 10^{-5}$. Эти характеристики согласуются с известными эмпирическими данными, приведенными Като и др. [11] для карликовых новых типа SU UMa. В то же время долговременная кривая блеска ASASSN-19fu содержит по крайней мере два поярчания, наблюдавшихся на фоне медленного возвращения к тому блеску, который объект имел до вспышки. Эта особенность до последнего времени считалась уникальной чертой именно короткопериодических карликовых новых типа WZ Sge [25]. Однако в последние годы стали появляться сообщения о наблюдении от одного до пяти поярчаний у некоторых из 11 долгопериодических систем, находящихся как в "провале", так и выше него (V1006 Cyg, MN Dra, ASASSN-14ho, CSS101212:002657+284933, ASASSN-18aan, ASASSN-19ax, QZ Ser, MIS 1448, OGLE-BLG-DN-0174, OGLE-BLG-DN-0595, ASASSN-15cm [23,26-34]). Таким образом, ASASSN-19 fu является 12-м членом этой группы. Природа поярчаний в настоящее время окончательно не выяснена (см. обзор свойств поярчаний у карликовых новых типа WZ Sge и различных предположений об их причине в статье Мейер и Мейер-Хофмейстер [35]). В частности, авторы заметили, что чаще всего поярчания имеют более крутую восходящую ветвь и более пологую нисходящую, т.е., развитие вспышки идет из внешних частей аккреционного диска во внутренние. Гораздо реже наблюдаются поярчания с противоположной асимметрией профиля, что соответствует распространению вспышки из внутренних частей диска во внешние. Именно такая особенность поярчаний была зарегистрирована нами у ASASSN-19fu.

Като [27] предположил, что требуется дополнительный резервуар вещества, чтобы обеспечивать появление поярчаний после сверхвспышки. У звезд типа WZ Sge это может быть вещество за пределами 3:1 резонансной орбиты. У долгопериодических систем, находящихся вблизи границы стабильности 3:1 резонанса, слабость резонанса может привести к преждевременному истощению вспышки и образованию запаса неаккрецированного вещества. Однако необходимы как наблюдения у других карликовых новых этого эффекта, так и теоретические подтверждения предложенной идеи.

Авторы работы благодарны коллективу, обеспечивающему использование ресурса The International Variable Star Index (база данных AAVSO). Часть наблюдательных данных, полученных и обработанных КАА, выполнены при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской

Федерации 075-15-2022-250 (13.МНПМУ.21.0003) "Многоволновое исследование нестационарных процессов во Вселенной".

¹ ФГБУН, Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Республика Крым, e-mail: eppvlenko@gmail.com

² Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, Россия

³ Институт астрофизики, Национальная академия наук, Республика Таджикистан

ASASSN-19fy: THE FEATURES OF A DWARF NOVA IN THE "PERIOD GAP"

O.I.ANTONYUK¹, E.P.PAVLENKO¹, K.A.ANTONYUK^{1,2}, N.V.PIT¹,
A.A.SOSNOVSKIY¹, G.I.KOKHIROVA³, F.D.RAKHMATULLAEVA³

Photometric investigations of the dwarf nova ASASSN-19fy in the period gap were carried out in 2020-2021 during 24 nights in the Crimean astrophysical observatory of RAS and 3 nights in Sanglokh International astronomical observatory of Institute of Astrophysics, National Academy of Sciences of Tajikistan. Observations covered superoutburst, two rebrightenings and slow return to quiescence. During this time superhumps have been observed. The stage of developed superhumps "B", their dying stage "C" as well as transition between them were identified. The mean superhump period at stage "B" was 0.09278(13) days, it increased with a rate of $(dP/dT)/P = 10 \cdot 10^{-5}$. At stage "C" the superhump period was 0.092289(15) days. It is shown that ASASSN-19fy is the twelfth object to join the group of long-period dwarf novae resembling WZ Sge-type stars.

Keywords: *stars: dwarf novae: outbursts: superhumps: ASASSN-19fy*

ЛИТЕРАТУРА

1. A.B.Davis, B.J.Shappee, A.Shappee et al., American Astron. Soc, **225**, 344, 2015. <http://cv.asassn.astronomy.ohio-state.edu/>.
2. B.Warner, Astrophys. Space Sci., **226**, 187, 1995.
3. C.Knigge, I.Baraffe, J.Patterson, Astron. J. Sup., **194**, 28, 2011.

4. *S.B.Howell, L.A.Nelson, S.Rappaport*, *Astrophys. J.*, **550**, 897, 2001.
5. *R.Stehle, U.Kolb, H.Ritter*, *Astron. Astrophys.*, **320**, 136, 1997.
6. *R.F.Webbink, D.T.Wickramasinghe*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **335**, 1, 2002.
7. *R.Whitehurst*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **232**, 35, 1988.
8. *Y.Osaki*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **108**, 39, 1996.
9. *M.Hirose, Y.Osaki*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **42**, 135, 1990.
10. *S.H.Lubow*, *Astrophys. J.*, **381**, 268, 1991.
11. *T.Kato, A.Imada, M.Uemura et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **61**, 395, 2009.
12. *T.Kato, H.Maehara, M.Uemura et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **62**, 1525, 2010.
13. *E.P.Pavlenko, T.Kato, A.A.Sosnovskij*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **66**, 111, 2014.
14. *T.Kato, F.-J.Hambsch, B.Monard et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **68**, 65, 2016.
15. *T.Kato*, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/23064>, 2019.
16. *T.Kato*, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/24519>, 2020.
17. *T.Vanmunster*, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/24521>, 2020.
18. *T.Kato*, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/24522>, 2020.
19. *T.Kato*, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/24586>, 2020.
20. *T.Kato*, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/24620>, 2020.
21. *J.Smak*, *Astrophys. Space Sci.*, **131**, 497, 1978.
22. *Ya.Pel't*, *Frequency analysis of astronomical time series*, Valgus, Tallin, 1980.
23. *T.Kato, E.P.Pavlenko, A.V.Shchurova et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **68**, 4, 2016.
24. *E.P.Pavlenko, S.Yu.Shugarov, O.A.Simon et al.*, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, **48**, 339, 2018.
25. *T.Kato*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **67**, 108, 2015.
26. *S.V.Antipin, E.P.Pavlenko*, *Astron. Astrophys.*, **391**, 565, 2002.
27. *T.Kato*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **72**, 2, 2020.
28. *T.Kato, T.Tordai, C.Littlefield et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **69**, 4, 2017.
29. *Ya.Wakamatsu, J.R.Thorstensen, N.Kojiguchi et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **73**, 1209, 2021.
30. *T.Kato, H.Itoh, S.Kiyota et al.*, <https://arxiv.org/abs/2111.01304>, 2021.
31. *J.R.Thorstensen, W.H.Fenton, J.Patterson et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **114**, 1117, 2002.
32. *T.Kato*, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/24912>, 2020.
33. *P.Mróz, A.Udalski, R.Poleski et al.*, *Acta Astron.*, **65**, 313, 2015.
34. *T.Kato*, <https://arxiv.org/abs/2302.09713>, 2023.
35. *F.Meyer, E.Meyer-Hofmeister*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **67**, 52, 2015.