ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2020, том 46, № 10, с. 721–734

ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКАЯ КАРЛИКОВАЯ НОВАЯ V2466 Cyg: СВЕРХВСПЫШКИ 2003 И 2019 гг.

© 2020 г. С. В. Антипин[1*], А. М. Зубарева[2,1], А. А. Белинский[1], М. А. Бурлак[1], Н. П. Иконникова[1], К. В. Соколовский[3,1]

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

[2] *Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

[3] *Центр интенсивной обработки данных и астрономии переменных объектов, Отделение физики и астрономии, Университет штата Мичиган, Мичиган, США*

Поступила в редакцию 11.09.2020 г.
После доработки 22.09.2020 г.; принята к публикации 22.09.2020 г.

Приведены результаты первых многоцветных фотометрических наблюдений необычной карликовой новой V2466 Лебедя во время сверхвспышек 2003 и 2019 гг. Полная амплитуда сверхвспышки 2019 г. в полосе R_c составила 7.4 звездной величины. В конце сверхвспышки 2019 г. наблюдался одиночный ребрайтенинг. Анализируя график $O-C$ для сверхгорбов, мы идентифицировали явно выраженные стадии A, B и C, соответствующие эволюции их периода. Средний период сверхгорбов $P = 0^{\rm d}.08143(3)$ для обеих сверхвспышек, относительное приращение периода сверхгорбов $P_{\rm dot} = 10.4(1.4) \times 10^{-5}$ в стадии B. Мы аргументируем классификацию V2466 Cyg как члена немногочисленной группы объектов, сочетающих характеристики карликовых новых типа SU UMa и типа WZ Sge, предложено объяснение эволюционного статуса этих объектов. В качестве дополнительного результата в окрестностях V2466 Cyg открыто и исследовано 20 новых переменных звезд.

Ключевые слова: методы: фотометрия, звезды: катаклизмические переменные, звезды: индивидуальные: V2466 Cyg.

DOI: 10.31857/S0320010820100010

1. ВВЕДЕНИЕ

Катаклизмические переменные звезды дают возможность наблюдать различные проявления аккреции вещества в тесных двойных системах. Главный компонент системы, белый карлик, получает вещество через внутреннюю точку Лагранжа от маломассивной вторичной звезды, красного карлика или субгиганта, заполняющей свой лепесток полости Роша. Карликовые новые являются подклассом катаклизмических переменных, в которых поток вещества от вторичного компонента формирует вокруг белого карлика аккреционный диск. Наблюдающиеся в системах вспышки на 2–8 звездных величин объясняются развитием тепловой неустойчивости аккреционного диска и его переходом от "холодного" состояния (нейтральный водород, низкий темп аккреции вещества на белый карлик) к "горячему" (ионизованный водород, высокий темп аккреции). Тот же механизм неустойчивости диска отвечает за вспышки маломассивных рентгеновских двойных систем (мягкие рентгеновские транзиенты, см. Амери, 2020).

Карликовые новые, относящиеся к подтипу SU UMa, демонстрируют два вида вспышек, различающиеся амплитудой и продолжительностью. Короткие (продолжительностью несколько суток) вспышки меньшей амплитуды называются нормальными. Длинные, имеющие продолжительность до нескольких недель и большую амплитуду, известны как сверхвспышки. Во время медленного падения блеска (фаза "плато" сверхвспышки) наблюдаются периодические изменения блеска, называемые сверхгорбами, характеризующиеся амплитудами до 0.3–0.4 звездной величины и периодами, на несколько процентов превышающими орбитальный период системы. Сверхгорбы также наблюдаются и в рентгеновских двойных системах (Торрес и др., 2019).

Сверхвспышки обычно объясняют приливной неустойчивостью аккреционного диска (Осаки,

* Электронный адрес: serge_ant@inbox.ru

Таблица 1. Журнал наблюдений

Диапазон HJD	Кол-во ночей	Кол-во кадров	Телескоп, полоса	Наблюдатель
2452867–883	16	506	Zeiss-600, B	С.В.А.
2452867–883	16	147	Zeiss-600, V	С.В.А.
2452868–876	9	637	AZT-5, V	С.В.А.
2452867–883	16	48	Zeiss-600, R_c	С.В.А.
2452867–883	16	43	Zeiss-600, I_c	С.В.А.
2458783–863	25	908	ASA RC600, R_c	А.А.Б., М.А.Б., Н.П.И.
2458813–833	13	18	ASA RC600, B	А.А.Б., М.А.Б., Н.П.И.
2458813–833	13	18	ASA RC600, V	А.А.Б., М.А.Б., Н.П.И.
2458813–833	12	16	ASA RC600, I_c	А.А.Б., М.А.Б., Н.П.И.

Примечание. С.В.А. — С.В. Антипин, А.А.Б. — А.А. Белинский, М.А.Б. — М.А. Бурлак, Н.П.И. — Н.П. Иконникова.

1989, 2005; Осаки и Като, 2013), которая развивается при достижении диском резонансного радиуса 3 : 1 в системах с маломассивными вторичными компонентами (отношение масс $q = M_2/M_1 < 0.25$). Прецессия линии апсид эксцентрического диска, сонаправленная с орбитальным движением, приводит к появлению "положительных" сверхгорбов. Их период — это период биений между периодом прецессии аккреционного диска и орбитальным периодом системы (Уайтхерст, 1988; Хиросе и Осаки, 1990).

Карликовые новые типа WZ Sge — подгруппа звезд типа SU UMa. Представители этой подгруппы показывают исключительно сверхвспышки. Интервалы между последовательными сверхвспышками у таких систем, называемые сверхциклами, составляют от полутора лет до десятилетий (Като, 2015), тогда как типичная продолжительность сверхцикла обычных звезд типа SU UMa — десятки суток. Амплитуды сверхвспышкек звезд типа WZ Sge могут превышать восемь звездных величин (см., например, Хауэл и др., 1995; Тампо и др., 2020), а нормальные вспышки отсутствуют (см. более подробную информацию о карликовых новых типа SU UMa и WZ Sge в обзорах Уорнера (1995) и Хельера (2001)).

Международный реестр переменных звезд Американской ассоциации наблюдателей переменных звезд (VSX AAVSO, Уотсон и др., 2006) на 8 июля 2020 г. содержит 957 звезд типа SU UMa (UGSU), включая неопределенные случаи, и 208 переменных типа WZ Sge (UGWZ), также включая неопределенные случаи[1] .

Выявление и изучение большего количества карликовых новых необходимо и для статистического анализа их свойств, и в конечном итоге для более полного понимания эволюции тесных двойных систем и аккреционных процессов.

С.В. Антипин открыл переменность блеска V2466 Cyg на архивных фотографических пластинках из коллекции снимков неба ГАИШ МГУ. Звезда была предварительно обозначена как Var76 Cyg (Антипин и Кролл, 2003). Сверхвспышка 2019 г. является первым с момента открытия упомянутым в публикации поярчанием переменной (VSNET-alert 23741[2]). В VSNET-alert 23753[3] приводится период сверхгорбов $P = 0^{\rm d}.08155(6)$.

В настоящей работе мы представляем фотометрическое исследование V2466 Cyg — пограничного объекта между двумя типами карликовых новых SU UMa и WZ Sge — во время сверхвспышек 2003 и 2019 гг.

Для наблюдений V2466 Cyg были использованы фильтры B, V, R_c, I_c. Журнал наблюдений представлен в табл. 1.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ

Фотометрические наблюдения 2003 и 2019 г. позволили изучить две сверхвспышки V2466 Cyg. Сверхвспышка августа 2003 г. наблюдалась на 60-см телескопе Цейсс-600 (в полосах B, V, R_c, I_c) и 50-см телескопе АЗТ-5 (в полосе V)

[1] Согласно классификации Общего каталога переменных звезд (Самусь и др., 2017), звезды типа WZ Sge являются подклассом звезд типа SU UMa. VSX AAVSO вслед за Даунсом и др. 2001 определяет их как два отдельных типа карликовых новых: UGSU и UGWZ.

[2] http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/23741

[3] http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/23753

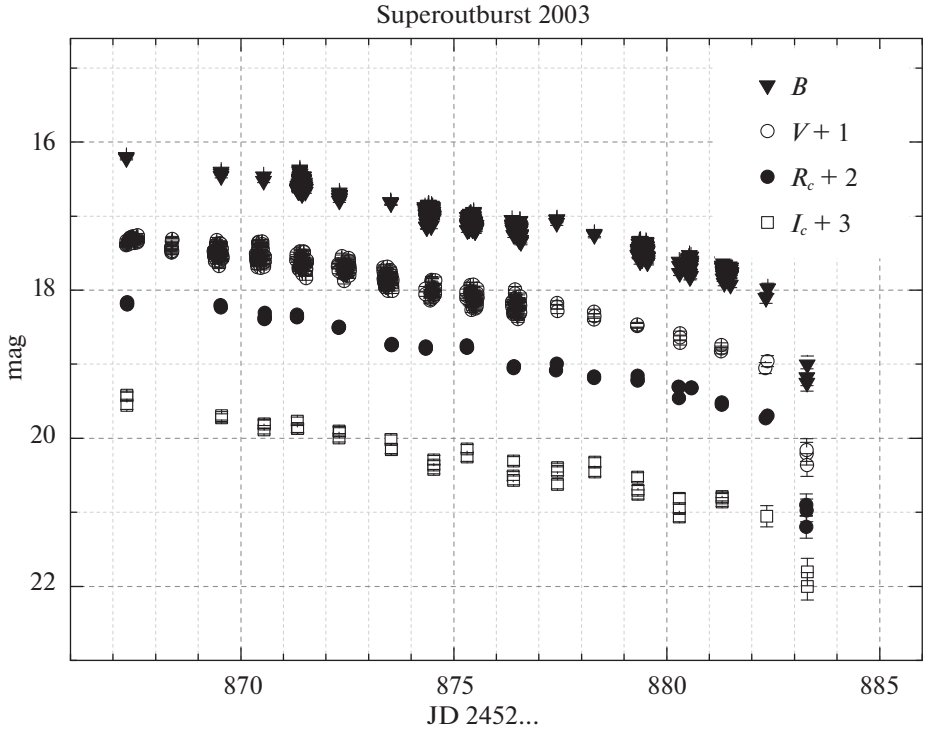

Рис. 1. Кривая блеска сверхвспышки V2466 Cyg 2003 г. в полосах B, V, R_c и I_c (каждая последующая полоса сдвинута на одну звездную величину от предыдущей).

Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ. Телескопы были оснащены ПЗС-камерами SBIG-ST7 и Meade Pictor-416 соответственно. В 2019 и 2020 гг. мы проводили мониторинг поля V2466 Cyg с помощью нового автоматизированного 60-см телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. 60-см рефлектор ASA RC600 был установлен в Кавказской горной обсерватории весной 2019 г. при поддержке Программы научного развития МГУ им. М.В. Ломоносова. Телескоп оснащен ПЗС-камерой Andor iKon–L (DZ936N-BV) 2048 × 2048 (Бердников и др., 2020). Для наблюдений V2466 Cyg были использованы фильтры B, V, R_c, I_c. Журнал наблюдений представлен в табл. 1.

Для апертурной фотометрии и калибровки шкалы звездных величин мы использовали программное обеспечение VaST[4] (Соколовский и Лебедев, 2018). Звездные величины звезд поля были взяты из каталогов APASS и USNO-B1.0 (Монэ и др., 2003). Кривые блеска сверхвспышек V2466 Cyg приведены на рис. 1–3. Кривые блеска для отдельных ночей, наиболее плотно покрытых наблюдениями, показаны на рис. 4–6. В 2003 г. наблюдения были получены преимущественно в полосах B и V, в 2019 г. — в полосе R_c.

[4] https://scan.sai.msu.ru/vast

Проводя целенаправленный мониторинг поля V2466 Cyg, мы обнаружили переменную в ярком состоянии 15 августа 2003 г. ($V = 16.3$ mag, JD2452867, левая панель на рис. 5). Через двое суток (JD2452869) на кривой блеска стали различимы сверхгорбы с амплитудой около 0.2 звездной величины. С этого момента стало ясно, что мы наблюдаем V2466 Cyg в сверхвспышке. Фаза плато продолжалась более 15 сут, в дату JD2452883 блеск объекта резко уменьшился до $V = 19$ mag. К сожалению, наблюдения в 2003 г. не велись ни до даты JD2452867, ни после JD2452883, поэтому мы не можем ничего сказать о полной продолжительности сверхвпышки 2003 г. и о наличии или отсутствии ребрайтенингов, т.е. повторных поярчаний объекта после окончания основной вспышки.

Летом 2019 г. мы возобновили регулярные наблюдения V2466 Cyg, но звезда находилась под пределом обнаружения. Наконец, 25 ноября (JD2458813) мы зарегистрировали новую вспышку V2466 Cyg, блеск составил $R_c = 15.7$ mag (см. верхнюю левую панель на рис. 6). В течение ночи блеск звезды постепенно увеличивался и достиг $R_c = 15.52$ mag, поэтому с уверенностью можно говорить о наблюдении начала вспышки. На том же уровне блеска карликовая новая находилась следующей ночью. Первые сверхгорбы с амплитудой 0.06 mag были обнаружены через пять суток (JD2458818). Спустя еще двое суток

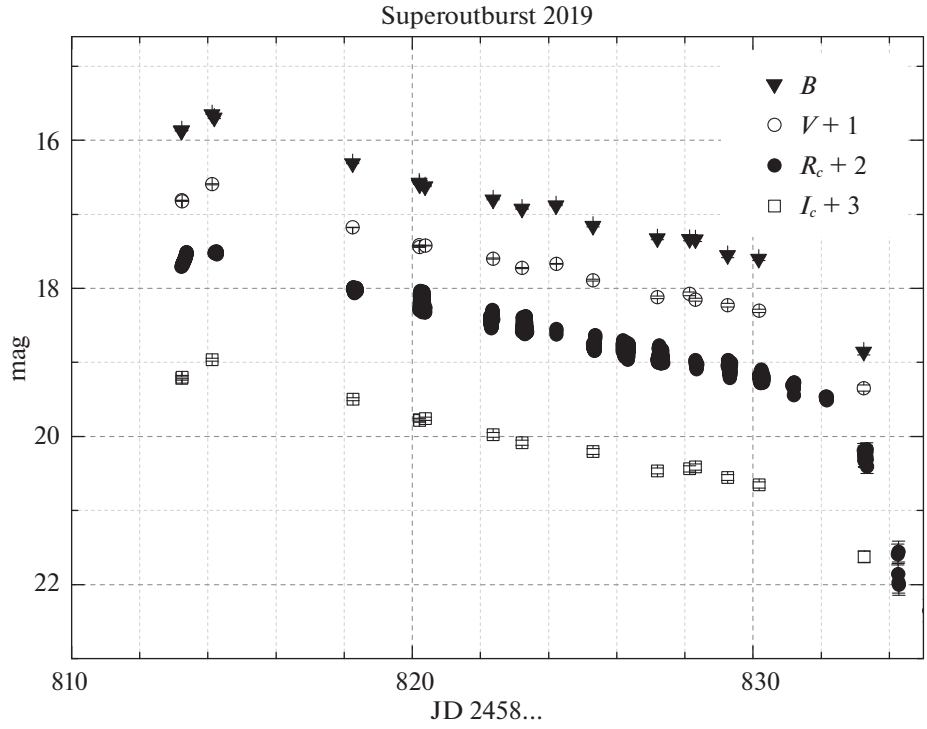

Рис. 2. Кривая блеска сверхвспышки V2466 Cyg 2019 г. в полосах B, V, R_c и I_c (каждая последующая полоса сдвинута на одну звездную величину от предыдущей).

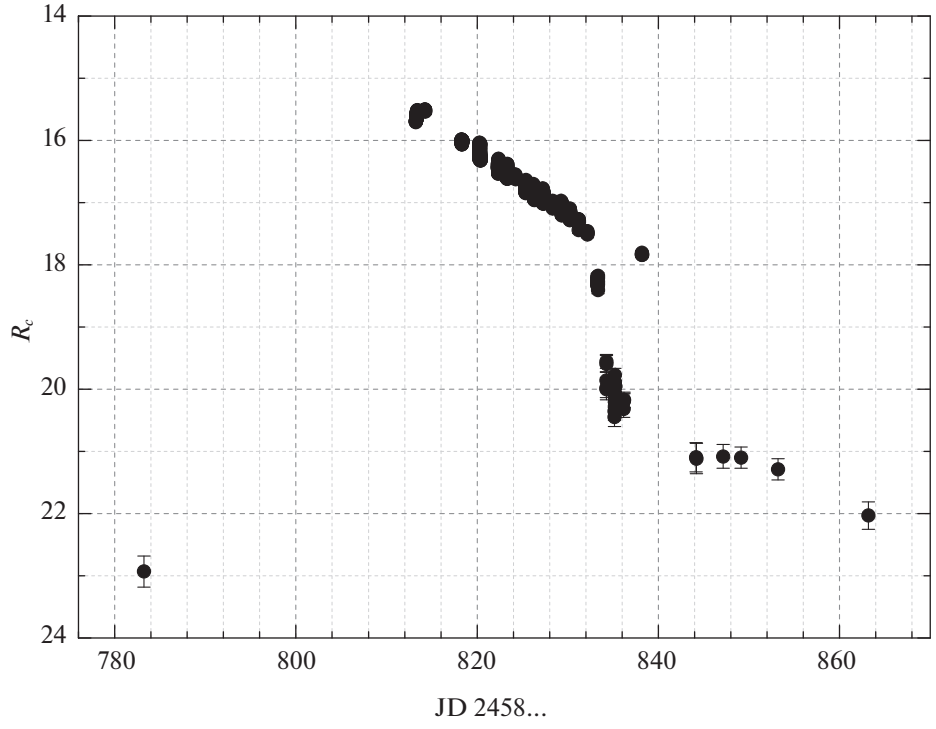

Рис. 3. Кривая блеска V2466 Cyg в полосе R_c за 2019–2020 гг.

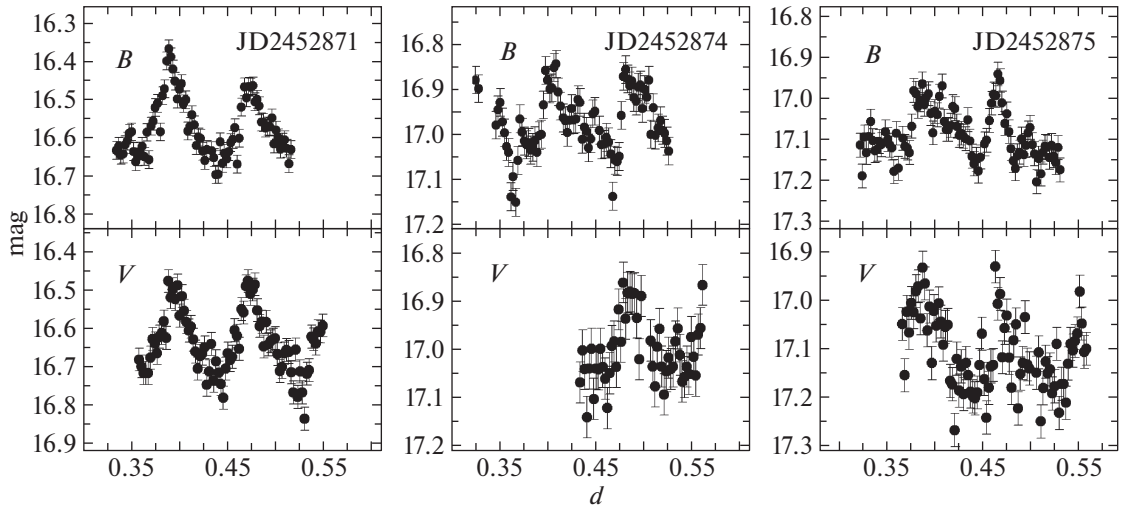

Рис. 4. Индивидуальные кривые блеска V2466 Cyg для нескольких ночей 2003 г., во время которых на двух телескопах проводились квазиодновременные наблюдения в полосах B и V.

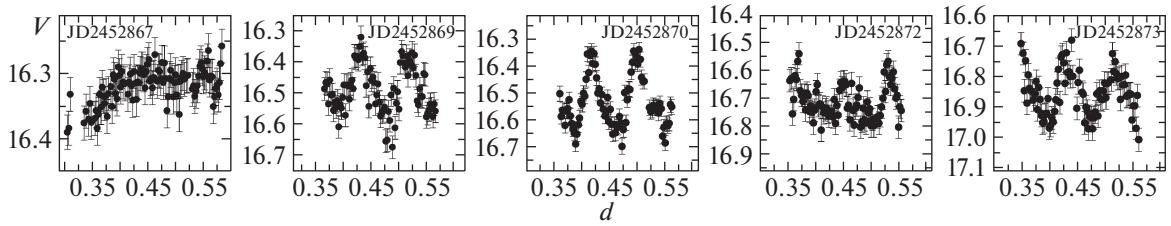

Рис. 5. Индивидуальные кривые блеска V2466 Cyg для отдельных ночей 2003 г. в полосе V.

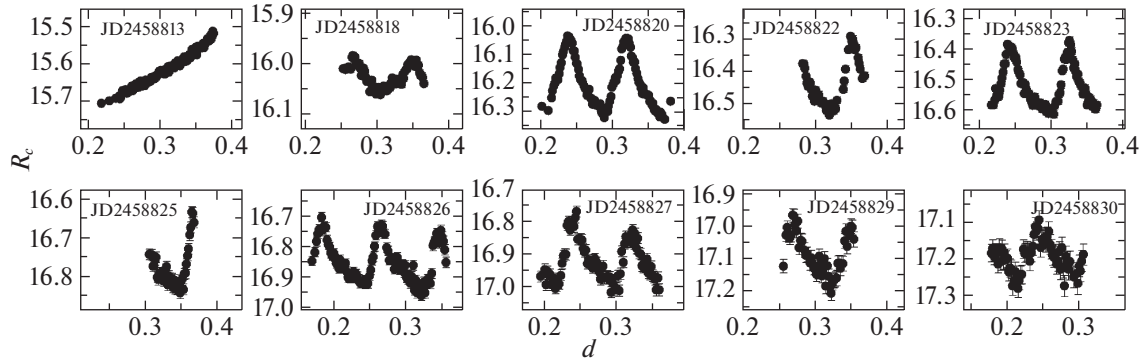

Рис. 6. Индивидуальные кривые блеска V2466 Cyg для отдельных ночей в 2019 г. в полосе R_c.

(JD2458820) амплитуда сверхгорбов достигала 0.3 mag. Фаза плато сверхвспышки продолжалась 18 сут, до JD2458832 ($R_c = 17.5$ mag). Через двое суток после падения блеска до уровня $R_c = 20.2$ mag (JD2458836) V2466 Cyg вновь поярчала до $R_c = 17.8$ mag. Хотя у нас не было возможности наблюдать объект в последующие четыре ночи из-за плохих погодных условий, мы с уверенностью можем говорить об обнаружении одиночного ребрайтенинга.

Повторные поярчания блеска, или ребрайтенинги, обнаруживаются через некоторое время после окончания основной вспышки у некоторых карликовых новых типа SU UMa, особенно у представителей подкласса WZ Sge. Блеск карликовой новой во время ребрайтенинга возрастает на две-три величины и часто практически возвращается на уровень, соответствующий окончанию фазы плато сверхвспышки, а иногда и превышает этот уровень. Имада и др. (2006) и Като (2015) различают пять типов ребрайтенингов: тип A — одиночный длительный ребрайтенинг, тип B — множественные ребрайтенинги, тип C — одиночный короткий ребрайтенинг, тип D — отсутствие ребрайтенингов

и тип E — двойная сверхвспышка. Като (2015) предположил, что последовательность типов C $\rightarrow$ $\rightarrow D \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow E$ может отражать эволюцию карликовых новых. В соответствии с этим определением в 2019 г. мы наблюдали у V2466 Cyg ребрайтенинг типа C, т.е. исследуемая карликовая новая представляет собой тесную двойную систему типа SU UMa, находящуюся в начальной стадии своей эволюции (см. раздел 5).

То, что у V2466 Cyg не было обнаружено нормальных вспышек, большая амплитуда сверхвспышек (см. раздел 3), а также наличие ребрайтенинга позволяют предположить, что система подобна карликовым новым типа WZ Sge, а не классическим звездам типа SU UMa. Однако отсутствие надежной информации о существовании ранних сверхгорбов (являющихся исключительным признаком объектов типа WZ Sge (Като, 2002)) не позволяет нам сделать окончательный вывод о классификации V2466 Cyg. К сожалению, начало фазы плато сверхвспышки 2019 г. не было плотно покрыто наблюдениями из-за плохих погодных условий. Возможно, в юлианскую дату JD2458818 (рис. 6) мы наблюдали ранние сверхгорбы, которые являются отличительной чертой систем типа WZ Sge, но говорить об этом с уверенностью нельзя из-за отсутствия наблюдений в предыдущие ночи.

Цветовые характеристики вспышек V2466 Cyg типичны для карликовых новых. Вспышки обусловлены значительным (в сотни раз) увеличением яркости аккреционного диска. Относительно спокойного состояния система голубеет. Во время фазы плато показатели цвета диска остаются практически неизменными, что и демонстрируют наши наблюдения. Показатели цвета $V - R_c$ и $R_c - I_c$ не меняются и на протяжении фазы плато вспышек 2003 и 2019 г. остаются на уровне $V - R_c = 0.19 \pm$ $\pm\, 0.02$ mag и $R_c - I_c = -0.48 \pm 0.03$ mag. Показатель цвета $B - V$ демонстрирует незначительное покраснение системы от начала к концу фазы плато сверхвспышек: в 2003 г. $B - V$ меняется от $-0.13 \pm$ $\pm\, 0.02$ в начале фазы плато до 0.11 ± 0.03 в конце, в 2019 г. — от 0.01 ± 0.02 до 0.29 ± 0.03. Небольшие (примерно на 0.15 mag) различия показателей цвета $B - V$ в фазе плато вспышек 2003 и 2019 г. могут быть объяснены некоторыми различиями фотометрических систем в полосе B в наблюдениях 2003 и 2019 г. Полоса B фотометрической системы Джонсона более точно реализована в наблюдениях 2019 г., именно эти показатели цвета должны рассматриваться как верные.

Для поиска периодов сверхгорбов мы использовали метод Диминга (1975), реализованный в программе К.В. Соколовского[5]. Перед началом

[5] http://scan.sai.msu.ru/lk/

Таблица 2. Моменты максимумов сверхгорбов. Номер цикла рассчитывался с использованием элементов (1) и (2)

HJD-2400000	Полоса	Ошибка	$O - C$, сут	E
52869.4328	V	0.0031	−0.00586	−38
52869.5152	V	0.0028	−0.00489	−37
52870.4163	V	0.0017	0.00048	−26
52870.4972	V	0.00187	−0.00005	−25
52871.3886	B	0.00167	−0.00438	−14
52871.3929	V	0.00207	−0.00008	−14
52871.4717	B	0.00143	−0.00271	−13
52871.4736	V	0.00173	−0.00081	−13
52872.5308	V	0.0022	−0.0022	0
52873.4227	V	0.00207	−0.00603	11
52874.4044	B	0.00163	−0.00149	23
52874.4849	B	0.0020	−0.00242	24
52874.4879	V	0.00247	0.00058	24
52875.3846	V	0.00327	0.00155	35
52875.4648	B	0.00100	0.00032	36
52876.4444	V	0.00233	0.00276	48
52876.5291	V	0.0027	0.00603	49
52879.3706	V	0.0027	−0.00252	84
58818.2689	R_c	0.0030	−0.01335	−25
58818.3495	R_c	0.00267	−0.01418	−24
58820.2396	R_c	0.0012	0.00303	−1
58820.321	R_c	0.00103	0.0030	0
58822.3504	R_c	0.00093	−0.00335	25
58823.2458	R_c	0.00107	−0.00368	36
58823.3278	R_c	0.00087	−0.00311	37
58825.3652	R_c	0.0013	−0.00146	62
58826.1835	R_c	0.00117	0.00254	72
58826.2643	R_c	0.00097	0.00191	73
58826.3454	R_c	0.00103	0.00158	74
58827.2427	R_c	0.00133	0.00315	85
58827.3217	R_c	0.00137	0.00072	86
58829.2701	R_c	0.00223	−0.0052	110
58830.2450	R_c	0.00267	−0.00746	122

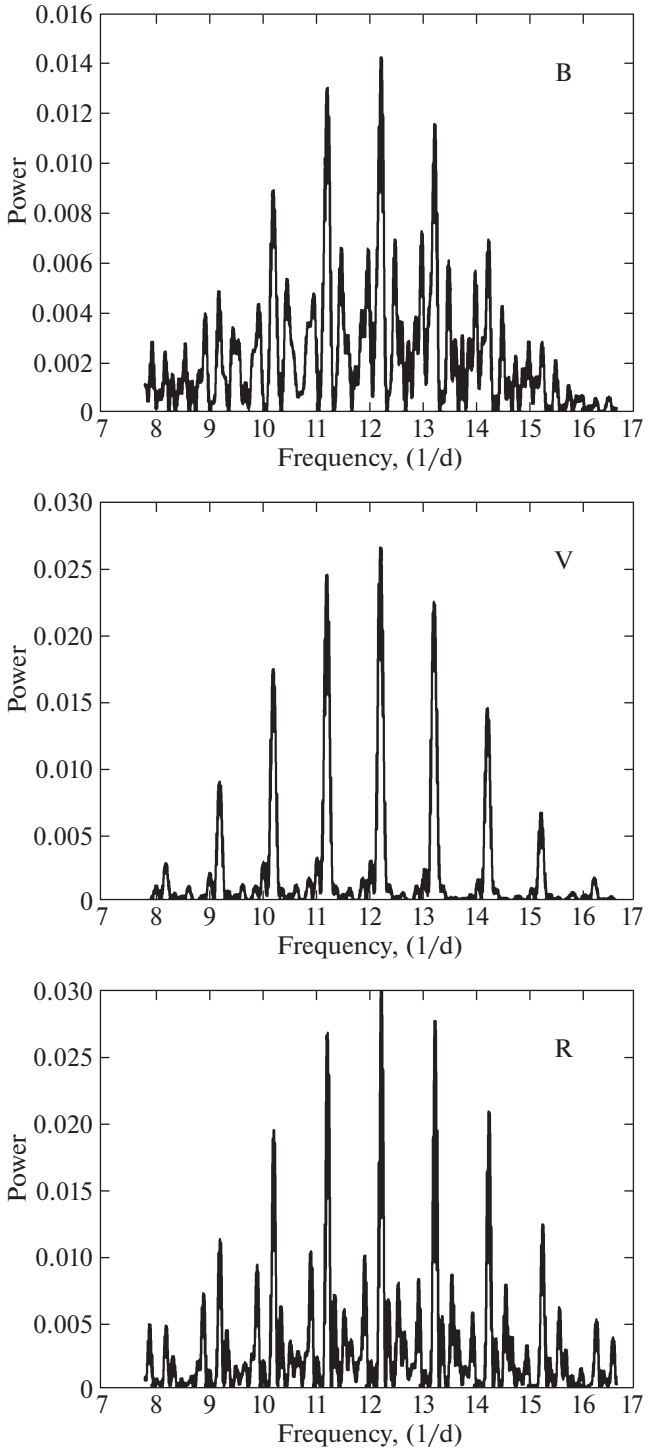

Рис. 7. Периодограммы для наблюдений в фазе плато сверхвспышек 2003 г. (B, V) и 2019 г. (R_c) после учета линейного тренда. Частота $f = 12.2805(45)$ циклов в сутки соответствует периоду $P = 0^{\rm d}.08143(3)$.

поиска периодичностей для каждой ночи наблюдений мы вычли из изменений блеска линейный тренд. Периодограммы для наблюдений в полосах B и V за 2003 г. и в полосе R_c за 2019 г. показаны на рис. 7. На всех трех периодограммах среди суточных сопряжений доминирует частота, соответствующая периоду $0^{\rm d}.08143$. Свернутые с этим периодом фазовые кривые блеска представлены на рис. 8. Сверхгорбы V2466 Cyg имеют обычную асимметричную форму с крутым подъемом и медленным спадом блеска.

Като и др. (2009) ввели разделение стандартной сверхвспышки карликовой новой на три стадии на основе эволюции периодов и амплитуд сверхгорбов. Стадия A соответствует наиболее продолжительному периоду и возрастанию амплитуды сверхгорбов. Во время стадии B период систематически изменяется, а амплитуда сверхгорбов медленно уменьшается. Стадия C соответствует еще более короткому, чем на стадии B, периоду сверхгорбов.

Исследуя изменения периода сверхгорбов V2466 Cyg, мы построили и проанализировали графики $O-C$. Для определения моментов максимумов были выбраны только сверхгорбы, хорошо покрытые наблюдениями, и ночи с хорошими погодными условиями. Расчет остатков $O-C$ производился с использованием следующих элементов изменения блеска:

$$2003: \quad JD_{\rm max} = 2452872.533 + 0.08143 \times E, \quad (1)$$

$$2019: \quad JD_{\rm max} = 2458820.318 + 0.08143 \times E. \quad (2)$$

Моменты максимумов сверхгорбов приведены в табл. 2.

Графики $O-C$ для сверхвспышек 2003 и 2019 гг. представлены на рис. 9 и 10. Форма графика имеет характерный профиль, стадии A, B, C явно выражены. Кроме того, изменения $O-C$ двух наблюденных сверхвспышек V2466 Cyg очень схожи друг с другом, для обеих сверхвспышек продолжительность стадии B близка к 80 циклам. Этот факт позволил нам построить сводный график $O-C$, совмещенный относительно начала стадии B (рис. 11). На основании поведения остатков $O-C$ мы рассматриваем интервал JD2452869-870 как стадию A, JD2452870-876 как стадию B и JD2452876-879 как стадию C сверхвспышки 2003 г. В 2019 г. мы рассматриваем интервалы JD2458818-820, JD2458820-827 и JD2458827-830 как стадии A, B и C соответственно. Эволюция периода сверхгорбов V2466 Cyg, отраженная в изменениях $O-C$, типична для большого числа карликовых новых типа SU UMa. В качестве характерного примера см. график $O-C$ для карликовой новой SW UMa на рис. 1 в работе Като и др. (2020). Изменение амплитуды сверхгорбов также типично для трех стадий развития сверхвспышки. Амплитуда в полосе R_c сначала резко возрастает от 0.06 mag (начало стадии A, JD2458818) до 0.30 mag (начало стадии B, JD2458820), а затем медленно уменьшается до

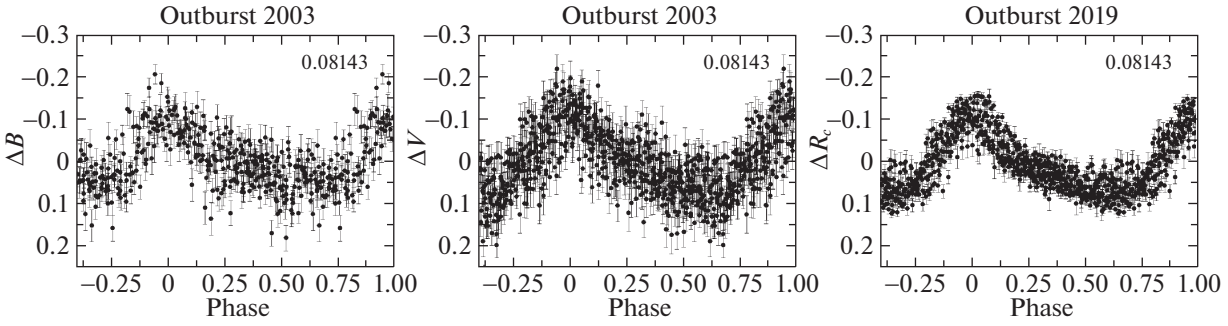

Рис. 8. Фазовые кривые блеска сверхгорбов V2466 Cyg для 2003 г. (в полосах B, V) и 2019 г. (в полосе R_c). Использованы элементы изменения блеска (1) и (2).

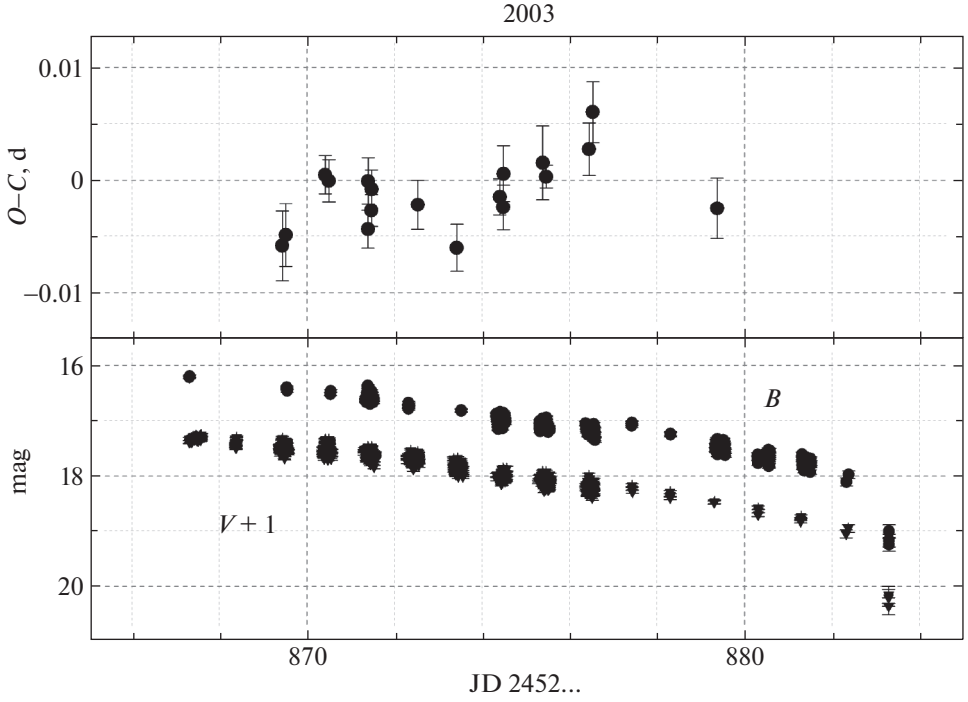

Рис. 9. Верхняя панель: график $O-C$ для сверхвспышки 2003 г. Для вычисления C использовались элементы изменения блеска (1). Нижняя панель: соответствующая кривая блеска сверхвспышки.

0.16 mag (окончание стадии C, JD2458830, см. рис. 6).

Анализ сводного графика $O-C$ позволил нам определить период сверхгорбов на стадии A: $P_{\rm shA} = 0^{\rm d}.08203(5)$. Мы вычислили период сверхгорбов на стадии C: $P_{\rm shC} = 0^{\rm d}.08118(3)$. Изменения периода сверхгорбов на стадии B могут быть аппроксимированы параболой ветвями вверх, т.е. период сверхгорбов в этом интервале линейно растет, средний период составил $P_{\rm shB} = 0^{\rm d}.08143(3)$. Относительное приращение периода сверхгорбов, определяемое как отношение приращения за один период к значению периода и традиционно обозначаемое $P_{\rm dot}$, равно $10.4(1.4)\times10^{-5}$.

3. V2466 Cyg В МИНИМУМЕ БЛЕСКА

26 октября 2019 г., до обнаружения сверхвспышки V2466 Cyg, мы получили четыре ПЗС-кадра в полосе R_c с экспозицией 15 мин каждый, чтобы оценить предельную звездную величину наших наблюдений на новом 60-см телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ и попытаться определить блеск V2466 Cyg в состоянии покоя. После сложения четырех изображений с помощью пакета MaxIm DL, мы обнаружили слабый объект ($S/N = 3.5$) на месте нашей переменной звезды. Полученное суммарное изображение приведено на рис. 12. Определенную нами звездную величину объекта ($R_c = 22.93 \pm 0.25$ mag) можно принять за минимальный блеск V2466 Cyg. Мак-

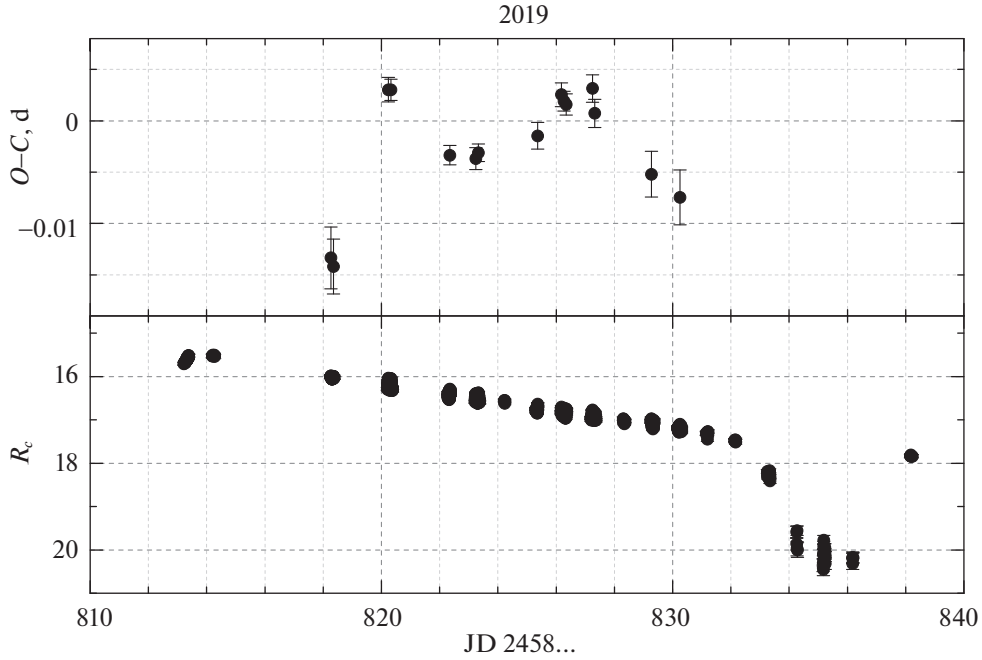

Рис. 10. Верхняя панель: график $O-C$ для сверхвспышки 2019 г. Для вычисления C использовались элементы изменения блеска (2). Нижняя панель: соответствующая кривая блеска сверхвспышки.

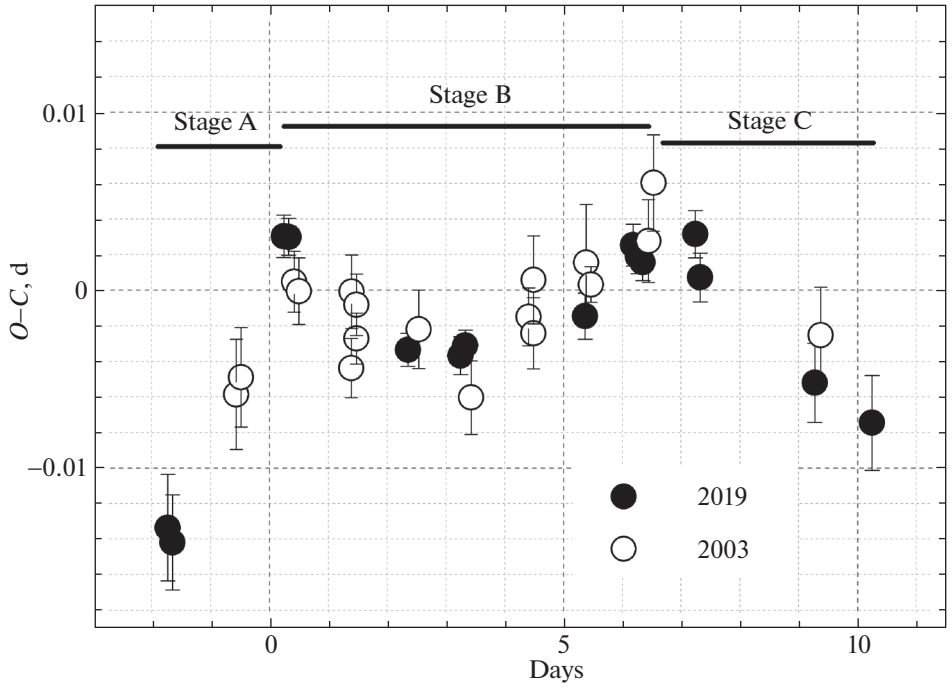

Рис. 11. Сводный график $O-C$ для двух наблюденных сверхвспышек V2466 Cyg.

симальный блеск во время сверхвспышки 2019 г. равен $R_c = 15.52$ mag. Таким образом, полная амплитуда сверхвспышки в полосе R_c составила 7.4 звездной величины.

Из-за малой светимости в настоящее время далеко не все карликовые новые SU UMa обнаружены и изучены в состоянии покоя. Для постоянно растущей подгруппы звезд SU UMa — карликовых новых подтипа WZ Sge — Като (2015) упоминает, что после окончания сверхвспышки они обычно остаются на величину более яркими, чем на довспышечном уровене. Рисунок 3 подкрепляет это утверждение.

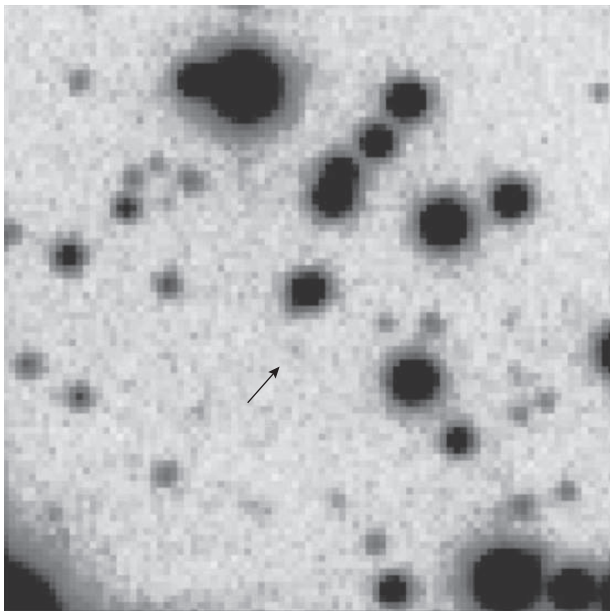

Рис. 12. Суммарное изображение V2466 Cyg в минимуме блеска (четыре кадра, общая экспозиция равна одному часу, $R_c = 22.93 \pm 0.25$ mag). Север вверху, восток слева, поле зрения $1' \times 1'$.

4. ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ В ПОЛЕ V2466 Cyg

В качестве дополнительного результата нашей работы мы провели поиск новых переменных звезд на серии кадров поля V2466 Cyg. ПЗС-изображения, полученные на 60-см телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, охватывают область неба размером $22' \times 22'$. Мы использовали наиболее многочисленные кадры исследуемой области, полученные в полосе R_c. Для поиска новых переменных применялся пакет программ VaST (Соколовский и Лебедев, 2018). Были построены кривые блеска около 6000 звезд в указанном поле и вычислен набор индексов переменности для каждой кривой блеска (Соколовский и др., 2017). Мы вручную изучили кривые блеска кандидатов в переменные звезды, выделенных программой путем вычисления значений индекса переменности и отбора тех случаев, когда индексы переменности значительно превысили ожидаемые значения для соответствующих звездных величин. Было обнаружено 20 новых переменных звезд, 19 из них — затменные двойные системы различных типов, и одна, вероятно, является звездой типа BY Dra. Фазовые кривые блеска новых переменных звезд приведены на рис. 13. Подробная информация об открытых объектах представлена в табл. 3.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы не можем с уверенностью говорить об отсутствии в системе V2466 Cyg нормальных вспышек, но ни одна из них до сих пор не наблюдалась. Что касается сверхвспышек, кроме двух описанных событий 2003 и 2019 г., об иных поярчаниях также не сообщалось. Не обнаружено вспышек и в базе данных ASAS-SN (Кочанек и др., 2017) в период с декабря 2014 г. по август 2020 г. На пластинках Московского и Зоннебергского архивов снимков неба обнаружено семь вспышек неопределенного типа (Антипин и Кролл, 2003). Оценить продолжительность сверхцикла на данный момент не представляется возможным. В качестве нижней границы оценки длины сверхцикла можно рассматривать поярчания, наблюдавшиеся фотографически и разделенные интервалом в два и три года.

Вакаматсу и др. (2017) выделяют небольшую группу необычных карликовых новых, близких по наблюдаемым характеристикам к V2466 Cyg, в которую входят BC UMa, RZ Leo, V1251 Cyg, QY Per, MASTER OT J004527.52+503213.8 и ASASSN-16eg. Авторы рассматривают эти карликовые новые как пограничные объекты между звездами типов SU UMa и WZ Sge, имеющие большие периоды сверхгорбов, близкие к нижней границе известного “пробела периодов” (между 2 и 3 часами), и показывающие одиночные ребрайтенинги. Мейер и Мейер-Гофмейстер (2015) объясняют явление ребрайтенингов как волну повышенной вязкости, распространяющуюся в пост-вспышечном аккреционном диске, вещество из которого еще не полностью аккрецировано белым карликом. Распространение волны повышенной вязкости, отраженной от внутренних частей диска и движущейся к внешнему его краю, вновь временно разогревает диск, что вызывает поярчание всей системы на две-три звездные величины, т.е. ребрайтенинг. Волна повышенной вязкости может многократно отражаться от краев диска, вызывая последующие поярчания до тех пор, пока основная масса вещества диска не будет аккрецирована белым карликом. Этот сценарий описывает в том числе и одиночный ребрайтенинг (типа C в определении Като, 2015), который мы наблюдали у V2466 Cyg в 2019 г.

Эволюция дисковых катаклизмических переменных звезд идет с уменьшением орбитального периода, массы вторичного компонента и темпа перетекания вещества красного карлика на белый карлик (Уорнер, 1995). Карликовые новые последовательно должны проходить стадию классических звезд типа SU UMa, характеризующихся большим орбитальным периодом (1.5—2 ч) и частыми вспышками, т.е. высоким темпом аккреции, и только потом становиться системами типа WZ Sge с орбитальными периодами менее полутора часов, с редкими вспышками большой амплитуды, отражающими низкий темп перетекания вещества в системе.

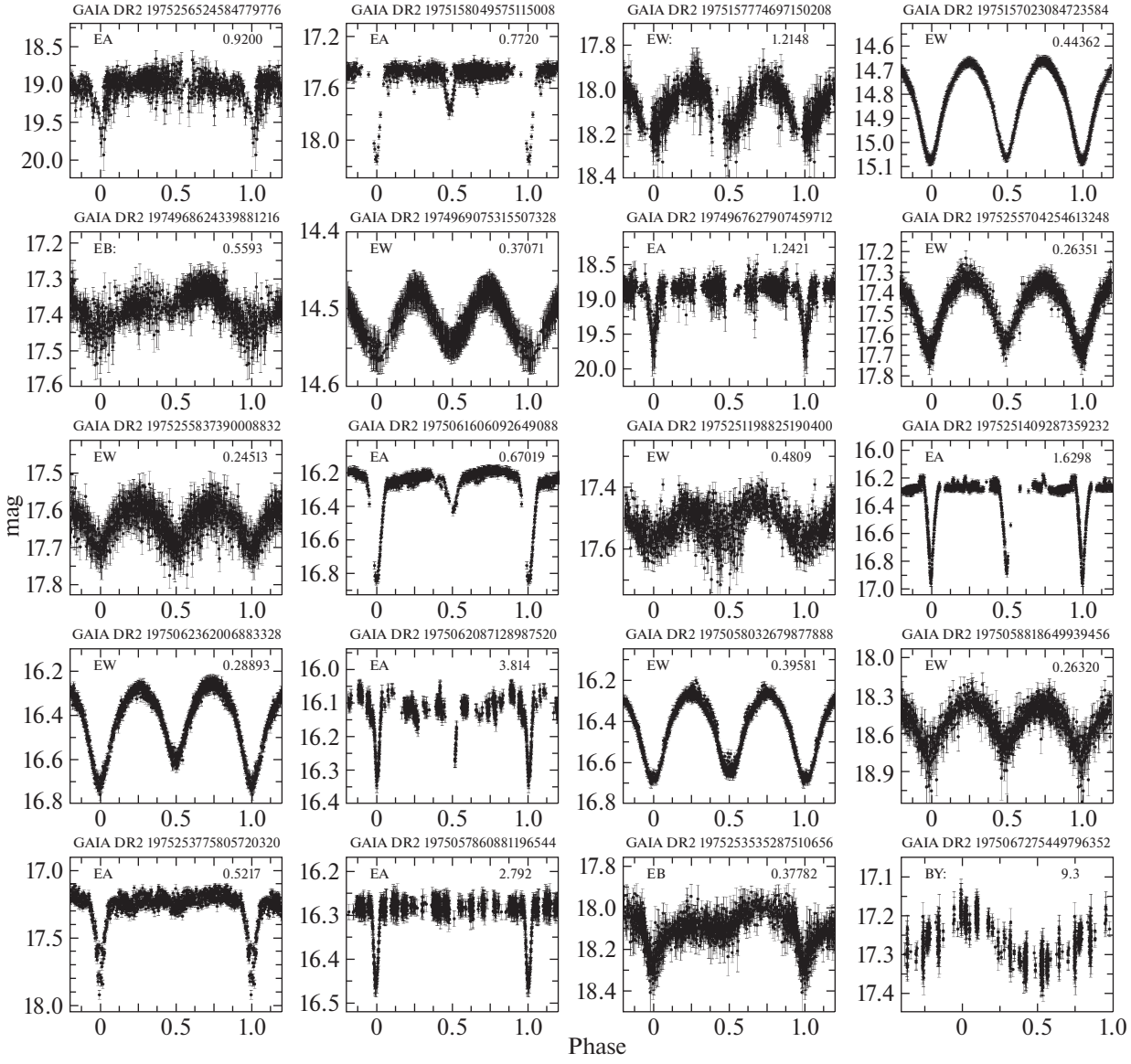

Рис. 13. Фазовые кривые блеска в полосе R_c для новых переменных звезд в поле V2466 Cyg.

Эволюционный статус переменной V2466 Cyg и подобных ей объектов, на первый взгляд, выглядит противоречивым. Они сочетают в себе характерные особенности проэволюционировавших карликовых новых типа WZ Sge, а именно редкие вспышки большой амплитуды, и, с другой стороны, наличие одиночного (типа C) ребрайтенинга и большие орбитальные периоды (или периоды сверхгорбов), что относит упомянутые карликовые новые к классическим переменным типа SU UMa, далеким от поздних стадий эволюции маломассивных тесных двойных систем.

В системах катаклизмических переменных аккреция вещества в интервале орбитальных периодов между двумя и тремя часами прерывается из-за того, что вторичный компонент становится полностью конвективным, его радиус уменьшается, и он уже не заполняет свой лепесток полости Роша. В дальнейшем эволюция системы идет с уменьшением орбитального периода, обусловленным излучением гравитационных волн. Вблизи нижней границы “пробела периодов” (∼2.15 ч) вторичный компонент снова начинает заполнять свой лепесток полости Роша, аккреция вещества на белый карлик постепенно возобновляется. Исходя из этого, должны существовать тесные двойные системы, в которых характеристики непроэволюционировавших, только что покинувших “пробел периодов” карликовых новых типа SU UMa, а именно, орбитальные периоды чуть меньше двух часов и ребрайтенинги типа C, будут сосуществовать с пока еще невысоким темпом перетекания вещества, а

Таблица 3. Переменные звезды, обнаруженные в поле V2466 Cyg

Обозначение	RA (J2000)	Dec (J2000)	USNO-B1.0	GAIA DR2	Тип	Период, сут	Нач. эпоха	Max	Min_I	Min_{II}
SAI-V J220141.50+464658.2	$22^h01^m41^s.504$	$+46°46'58''.19$	1367-0472274	1975256524584779776	EA	0.9200:	2458833.3	18.93	19.75	
SAI-V J220141.54+463709.7	$22^h01^m41^s.543$	$+46°37'09''.65$	1366-0463345	1975158049575115008	EA	0.7720:	2458835.18	17.45	18.15	17.77
SAI-V J220144.51+463547.8	$22^h01^m44^s.510$	$+46°35'47''.81$	1365-0454896	1975157774697150208	EW:	1.2148:	2458825.32	17.98	18.19	18.18
SAI-V J220149.34+463513.5	$22^h01^m49^s.341$	$+46°35'13''.53$	1365-0454966	1975157023084723584	EW	0.44362	2458818.315	14.66	15.07	15.06
SAI-V J220158.57+462903.6	$22^h01^m58^s.565$	$+46°29'03''.59$	1364-0458326	1974968624339881216	EB:	0.5593:	2458830.253	17.32	17.46	17.38
SAI-V J220204.89+463254.4	$22^h02^m04^s.886$	$+46°32'54''.43$	1365-0455197	1974969075315507328	EW	0.37071	2458822.303	14.48	14.56	14.55
SAI-V J220207.21+462813.7	$22^h02^m07^s.214$	$+46°28'13''.66$	1364-0458442	1974967627907459712	EA	1.2421	2458827.26	18.80	19.75	
SAI-V J220207.70+464542.4	$22^h02^m07^s.697$	$+46°45'42''.43$	1367-0472656	1975255704254613248	EW	0.26351	2458830.193	17.32	17.69	17.64
SAI-V J220214.34+464643.7	$22^h02^m14^s.340$	$+46°46'43''.72$	1367-0472743	1975255837390008832	EW	0.24513	2458820.302	17.59	17.71	17.70
SAI-V J220218.22+463000.6	$22^h02^m18^s.217$	$+46°30'00''.59$	1365-0455410	1975061606092649088	EA	0.67019	2458830.192	16.19	16.83	16.42
SAI-V J220219.56+463738.4	$22^h02^m19^s.564$	$+46°37'38''.35$	1366-0463904	1975251198825190400	EW	0.4809	2458826.184	17.45	17.58	17.55
SAI-V J220228.16+464032.4	$22^h02^m28^s.159$	$+46°40'32''.38$		1975251409287359232	EA	1.6298	2458823.275	16.23	16.95	16.86
SAI-V J220233.65+463355.5	$22^h02^m33^s.651$	$+46°33'55''.54$	1365-0455608	1975062362006883328	EW	0.28893	2458831.160	16.24	16.72	16.61
SAI-V J220236.70+463159.6	$22^h02^m36^s.698$	$+46°31'59''.58$	1365-0455649	1975062087128987520	EA	3.814	2458826.36	16.07	16.33	
SAI-V J220245.70+462832.4	$22^h02^m45^s.699$	$+46°28'32''.38$	1364-0458932	1975058032679877888	EW	0.39581	2458823.294	16.26	16.68	16.64
SAI-V J220248.05+463008.0	$22^h02^m48^s.050$	$+46°30'07''.99$	1365-0455819	1975058818649939456	EW	0.26320	2458822.354	18.34	18.75	18.72
SAI-V J220250.61+464711.2	$22^h02^m50^s.609$	$+46°47'11''.21$	1367-0473247	1975253775805720320	EA	0.5217	2458820.358	17.16	17.80	17.28
SAI-V J220301.45+462834.8	$22^h03^m01^s.447$	$+46°28'34''.81$	1364-0459164	1975057860881196544	EA	2.792:	2458826.17	16.28	16.46	
SAI-V J220302.61+464526.2	$22^h03^m02^s.614$	$+46°45'26''.23$	1367-0473432	1975253535287510656	EB	0.37782	2458825.360	18.00	18.31	18.12
SAI-V J220339.60+464051.4	$22^h03^m39^s.600$	$+46°40'51''.43$	1366-0464987	1975067275449796352	BY:	9.3	2458822.3	17.19	17.33	

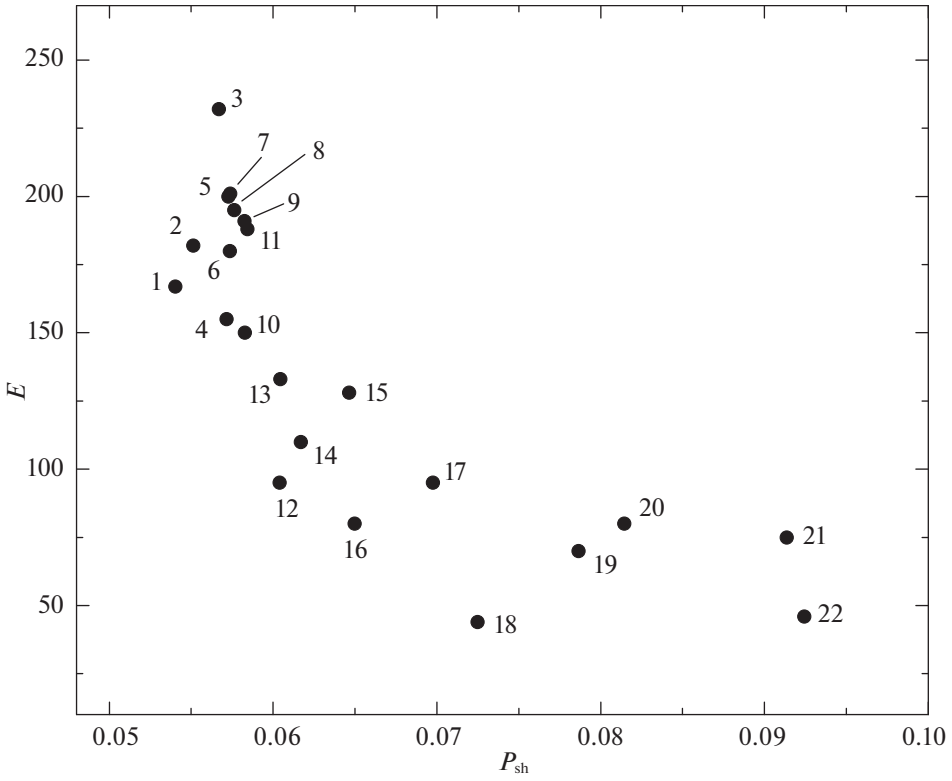

Рис. 14. Зависимость продолжительности стадии B (в циклах) от периода сверхгорбов. Цифрами отмечены индивидуальные объекты: 1 — ASASSN-16bh, 2 — ASASSN-17el, 3 — ASASSN-15bp, 4 — V391 Cam, 5 — ASASSN-17ei, 6 — PNV J03093063+2638031, 7 — PNV J20205397+2508145, 8 — ASASSN-17kg, 9 — SW UMa, 10 — HV Vir, 11 — TCP J18001854−3533149, 12 — OV Dra, 13 — V585 Lyr, 14 — TCP J01375892+4951055, 15 — OY Car, 16 — V453 Nor, 17 — V650 Peg, 18 — BB Ari, 19 — RZ Leo, 20 — V2466 Cyg, 21 — MASTER J212624.16+253827.2, 22 — ASASSN-15cl.

следовательно, редкими сверхвспышками большой амплитуды. Именно так можно объяснить наблюдаемые характеристики V2466 Cyg и подобных объектов, выделенных Вакаматсу и др. (2017).

Исследуя изменения периодов сверхгорбов переменных типа SU UMa, можно выявить две отличающиеся друг от друга группы звезд. На графиках $O-C$ некоторых карликовых новых стадия B развития сверхгорбов выражена слабо или вовсе отсутствует. В качестве примера можно привести MN Dra и UV Gem (Като и др., 2009). Вторая группа звезд, в которую входит и V2466 Cyg, показывает ярко выраженную стадию B. Рассматривая вариации периода таких звезд из серии работ по изучению эволюции периодов сверхгорбов (Като и др., 2015, 2016, 2017, 2020), мы заметили, что звезды с длинными периодами сверхгорбов демонстрируют более короткую продолжительность стадии B, стадия B занимает меньшую долю фазы плато сверхвспышки (рис. 14). Обнаруженная зависимость, по нашему мнению, отражает тот факт, что полость Роша белого карлика тесных двойных систем с коротким $P_{\rm orb}$ ($P_{\rm sh}$) имеет относительно небольшие размеры, и во время развития сверхвспышки внешние части диска быстро достигают необходимого резонансного радиуса 3 : 1 и дольше испытывают приливное воздействие вторичного компонента.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено подробное фотометрическое исследование карликовой новой V2466 Cyg в течение двух сверхвспышек 2003 и 2019 гг. После основной вспышки 2019 г. зафиксирован одиночный короткий ребрайтенинг. Амплитуда сверхвспышки 2019 г. в полосе R_c составила 7.4 звездной величины, пределы изменения блеска R_c: 15.52–22.93.

Прослежена эволюция периода и амплитуды сверхгорбов во время двух наблюдавшихся сверхвспышек. На графике $O-C$ выделены три стадии изменения периода сверхгорбов, характерные для большого числа карликовых новых типа SU UMa. Определены периоды сверхгорбов на стадиях A и C, равные $0\overset{\rm d}{.}08203(5)$ и $0\overset{\rm d}{.}08118(3)$ соответственно. На стадии B период сверхгорбов линейно увеличивается, средний период составил $0\overset{\rm d}{.}08143(3)$, относительное приращение периода сверхгорбов $P_{\rm dot} = 10.4(1.4) \times 10^{-5}$.

Показано, что V2466 Cyg относится к очень немногочисленной группе необычных маломассивных тесных двойных систем, сочетающих наблюдательные проявления проэволюционировавших карликовых новых, а именно редкие вспышки большой амплитуды, длинные сверхциклы, с признаками непроэволюционировавших звезд типа SU UMa, такими как большой период сверхгорбов и одиночный короткий ребрайтенинг.

В качестве дополнительного результата в окрестностях V2466 Cyg обнаружено и исследовано 20 новых переменных звезд.

Мы благодарим проф. К.А. Постнова и проф. Н.Н. Самуся за полезные обсуждения, а также анонимных рецензентов за ценные замечания. Это исследование стало возможным благодаря наблюдениям на 60-см рефлекторе КГО ГАИШ МГУ, установленном на средства Программы научного развития МГУ им. М.В. Ломоносова, а также благодаря использованию обзора AAVSO Photometric All-Sky Survey (APASS), финансируемого Научным фондом Роберта Мартина Айерса и NSF AST-1412587. К.В. Соколовский благодарит за поддержку Фонд Паккарда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амери (J.M. Hameury), Adv. Sp. Res. **66**, 1004 (2020).
2. Антипин, Кролл (S.V. Antipin and P. Kroll), Inform. Bull. Var. Stars **5461**, 1 (2003).
3. Бердников и др. (L.N. Berdnikov, A.A. Belinskii, N.I. Shatskii, M.A. Burlak, N.P. Ikonnikova, E.O. Mishin, D.V. Cheryasov, S.V. Zhuiko), Astron. Rep. **64**, 310 (2020).
4. Вакаматсу и др. (Y. Wakamatsu, K. Isogai, M. Kimura, T. Kato, T. Vanmunster, G. Stone, T. Tordai, M. Richmond, et al.), Publ. Astron. Soc. Pac. **69**, 89 (2017).
5. Даунс и др. (R.A. Downes, A.A. Henden, and A. Price), Publ. Astron. Soc. Pac. **113**, 764 (2001).
6. Диминг (T.J. Deeming), Astrophys. Space Sci. **36**, 137 (1975).
7. Имада и др. (A. Imada, K. Kubota, T. Kato, D. Nogami, H. Maehara, K. Nakajima, M. Uemura, and R. Ishioka), Publ. Astron. Soc. Pac. **58**, L23 (2006).
8. Като (T. Kato), Publ. Astron. Soc. Pac. **54**, L11 (2002).
9. Като (T. Kato), Publ. Astron. Soc. Pac. **67**, 108 (2015).
10. Като и др. (T. Kato, A. Imada, M. Uemura, D. Nogami, H. Maehara, R. Ishioka, H. Baba, K. Matsumoto, et al.), Publ. Astron. Soc. Pac. **61**, S395 (2009).
11. Като и др. (T. Kato, F.-J. Hambsch, P.A. Dubovsky, I. Kudzej, B. Monard, I. Miller, H. Itoh, S. Kiyota, et al.), Publ. Astron. Soc. Pac. **67**, 105 (2015).
12. Като и др. (T. Kato, F.-J. Hambsch, B. Monard, T. Vanmunster, Y. Maeda, I. Miller, H. Itoh, S. Kiyota, et al.), Publ. Astron. Soc. Pac. **68**, 65 (2016).
13. Като и др. (T. Kato, K. Isogai, F.-J. Hambsch, T. Vanmunster, H. Itoh, B. Monard, T. Tordai, M. Kimura, et al.), Publ. Astron. Soc. Pac. **69**, 75 (2017).
14. Като и др. (T. Kato, K. Isogai, Y, Wakamatsu, F.-J. Hambsch, H. Itoh, T. Tordai, T. Vanmunster, P. A. Dubovsky, et al.), Publ. Astron. Soc. Pac. **72**, 14 (2020).
15. Кочанек и др. (C.S. Kochanek, B.J. Shappee, K.Z. Stanek, T.W.S. Holoien, T.A. Thompson, J.L. Prieto, S. Dong, J.V. Shields, et al.), Publ. Astron. Soc. Pac. **129**, 104502 (2017).
16. Мейер и Мейер-Гофмейстер (F. Meyer and E. Meyer-Hofmeister), Publ. Astron. Soc. Pac. **67**, 52 (2015).
17. Монэ и др. (D.G. Monet, S.E. Levine, B. Canzian, H.D. Ables, A.R. Bird, C.C. Dahn, H.H. Guetter, H.C. Harris, et al.), Astron. J. **125**, 984 (2003).
18. Осаки (Y. Osaki), Publ. Astron. Soc. Pac. **41**, 1005 (1989).
19. Осаки (Y. Osaki), Proc. of the Japan Academy, Ser. B **81**, 291 (2005).
20. Осаки, Като (Y. Osaki and T. Kato), Publ. Astron. Soc. Pac. **65**, 50 (2013).
21. Самусь и др. (N.N. Samus', E.V. Kazarovets, O.V. Durlevich, N.N. Kireeva, and E.N. Pastukhova), Astron. Rep. **61**, 80 (2017).
22. Соколовский и др. (K.V. Sokolovsky, P. Gavras, A. Karampelas, S.V. Antipin, I. Bellas-Velidis, P. Benni, A.Z. Bonanos, A.Y. Burdanov, et al.), MNRAS **464**, 274 (2017).
23. Соколовский, Лебедев (K.V. Sokolovsky and A.A. Lebedev), Astron. Comput. **22**, 28 (2018).
24. Тампо и др. (Y. Tampo, K. Naoto, K. Isogai, T. Kato, M. Kimura, Y. Wakamatsu, D. Nogami, T. Vanmunster, et al.), Publ. Astron. Soc. Pac. **72**, 49 (2020).
25. Торрес и др. (M.A.P. Torres, J. Casares, F. Jiménez-Ibarra, T. Muñoz-Darias, M. Armas Padilla, P.G. Jonker, and M. Heida), Astrophys. J. Lett. **882**, L21 (2019).
26. Уайтхерст (R. Whitehurst), MNRAS **232**, 35 (1988).
27. Уорнер (B. Warner), *Cataclysmic Variable Stars* (Cambridge Univer. Press, 1995).
28. Уотсон и др. (C.L. Watson, A.A. Henden, and A. Price), Soc. Astron. Sci. Ann. Symp. **25**, 47 (2006).
29. Хауэл и др. (S.B. Howell, P. Szkody, and J.K. Cannizzo), Astrophys. J. **439**, 337 (1995).
30. Хельер (C. Hellier), *Cataclysmic Variable Stars* (Springer, Berlin, 2001).
31. Хирose, Осаки (M. Hirose and Y. Osaki), Publ. Astron. Soc. Pac. **42**, 135 (1990).