

ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ СВЕРХГОРБОВ КАРЛИКОВЫХ НОВЫХ ТИПА SU UMa. I. MN Dra (2012-2017гг.)

А.С.СКЛЯНОВ¹, Е.П.ПАВЛЕНКО², К.А.АНТОНЮК², Н.В.ПИТЬ²,
В.П.МАЛАНУШЕНКО³, А.В.ШУРОВА⁴, А.-М.А.ЗАОСТРОЖНЫХ¹,
С.Ю.ШУГАРОВ^{4,5}, А.А.СОСНОВСКИЙ², Ю.В.БАБИНА²,
О.И.АНТОНЮК², А.О.СИМОН⁶, Р.Я.ЖУЧКОВ¹, А.Г.ГУТАЕВ¹

Поступила 25 августа 2019

Представлены результаты фотометрического исследования карликовой новой MN Dra, проведенного в 2012-2017гг. на девяти телескопах в течение 152-х ночей. В общей сложности наблюдения охватили 4 сверхвыскачки, 7 нормальных всплесков и спокойное состояние между ними. Интервал между соседними сверхвыскачками 2017г. составлял 65 сут., а между соседними нормальными всплесками - 15 сут. Во время сверхвыскачек 2012 и 2017гг. наблюдались положительные сверхгорбы со средним периодом 0.10558(6) и 0.10500(2) сут., соответственно, а в спокойном состоянии - отрицательные сверхгорбы со средним периодом 0.095921(3) сут. Показано, что период отрицательных сверхгорбов циклически изменялся между нормальными всплесками: резко уменьшался во время всплески и постепенно возрастал к началу следующей всплески. Такой характер изменения периода отрицательных сверхгорбов может соответствовать быстрому увеличению радиуса аккреционного диска во время всплески и последующему медленному его уменьшению, что находится в соответствии с теорией термоприливной неустойчивости.

Ключевые слова: *MN Dra: катаклизмические переменные: отрицательные сверхгорбы: эволюция отрицательных сверхгорбов: аккреция*

1. Введение. Катаклизмические переменные - это тип тесных двойных систем, состоящих из белого карлика (главного компонента) и проэволюционировавшей звезды Главной последовательности (вторичный компонент), заполнившей свою полость Роша. Вещество со вторичного компонента перетекает на главный через внутреннюю точку Лагранжа, образуя аккреционный диск вокруг белого карлика [1].

Карликовые новые являются подтипом катаклизмических переменных. Данные системы характеризуются наличием регулярных всплесков с амплитудой 2^m-6^m и характерной продолжительностью от нескольких суток до нескольких недель. В качестве механизма возникновения данных всплесков принято считать появление тепловой неустойчивости в аккреционном диске [1].

SU UMa - это подкласс карликовых новых звезд. Их отличительной особенностью является наличие двух типов всплесков: нормальные всплески -

продолжительностью несколько суток; сверхвспышки - продолжительностью до 2-3 недель. Орбитальные периоды звезд типа SU UMa находятся в пределах от 76 мин. до ~3.18 часа [2].

Возникновение сверхвспышек связывают с возникновением в аккреционном диске приливной неустойчивости, вызванной достижением внешним радиусом диска резонанса 3:1 между вращениями диска и вторичного компонента [3]. Характерное время, проходящее между последовательными сверхвспышками, называют сверхциклом данной системы. Под воздействием приливной неустойчивости аккреционный диск становится эллиптическим и возникает прецессия линии апсид. Апсидальная прецессия приводит к возникновению колебаний блеска звезды с периодами на несколько процентов больше, чем орбитальный период системы. Данные колебания, которые можно наблюдать во время сверхвспышек, называют положительными сверхгорбами [3]. Периоды сверхгорбов эволюционируют в процессе сверхвспышки и в общем случае могут проходить 3 стадии А, В и С [4].

Кроме положительных сверхгорбов, у некоторых катаклизмических переменных были обнаружены колебания блеска с периодами на несколько процентов меньше, чем орбитальный. Данные колебания получили название "отрицательные сверхгорбы" [5-7]. Их появление связывают с возникновением нодальной прецессии аккреционного диска, приводящей к тому, что струя перетекающего вещества будет сталкиваться с аккреционным диском на разных расстояниях в зависимости от наклона диска и его ориентации относительно вторичного компонента [7-10]. На данный момент нет однозначного ответа, что вызывает наклон аккреционного диска. В качестве возможных механизмов предлагаются следующие: взаимодействие между диском и струей перетекающего вещества [11-13], приливные эффекты, вызванные вторичным компонентом [14-17], излучение главного компонента [17-24], магнитное поле вторичного компонента [25], магнитное поле главного компонента [18,26,27] и др. Было показано, что для успешного детектирования переменности блеска, связанного с нодальной прецессией, нужно, чтобы наклон аккреционного диска составлял не менее 4° [28]. У карликовых новых типа SU UMa отрицательные сверхгорбы обычно наблюдаются только в спокойном состоянии и во время нормальных вспышек. Исключением являются три объекта: ER UMa, V1504 Cyg и V344 Lyr, у которых они наблюдались во время сверхвспышек [29-32].

Распределение орбитальных периодов катаклизмических переменных показывает значительно меньшее количество систем с периодами, находящимися в диапазоне от 2.15 до 3.18 часов. Данный промежуток получил название "пробел (или провал) периодов" ("period gap") и связан с переключением основного механизма потери углового момента системой [2].

Звезда MN Dra была обнаружена Антипиным на архивных фотопластинках

в 2001г. Первоначально ей было присвоено обозначение Var73 Dra. Последовавшая кампания наблюдений классифицировала данную систему как карликовую новую типа SU UMa, с орбитальным периодом, попадающим в "пробел периодов" [33]. Период положительных сверхгорбов был определен как $0^d.0954$, но не исключен и вероятный суточно-сопряженный период $0^d.104$. Интервал между соседними нормальными вспышками был относительно короткий - около 8 сут. [33]. Далее в 2002-2003гг. последовала еще одна кампания по наблюдению данной звезды [34]. Период сверхгорбов был уточнен и составил $0^d.104885(93)$. Сверхцикл системы был определен как ~ 60 дней. Также была обнаружена периодичность в минимуме блеска с периодом $0^d.10424(3)$ [34]. Это послужило основой предположению о том, что у данной звезды наблюдаются перманентные положительные сверхгорбы. В 2009г. период колебаний блеска в спокойном состоянии был уточнен до 0.096 дня, что позволило идентифицировать его как период отрицательных сверхгорбов [35]. Орбитальный период системы был оценен Павленко и др. [35] как $0^d.0998(2)$ и Баковской и др. как $0^d.0994(1)$ [36]. Павленко и др. [35] впервые выявили, что период отрицательных сверхгорбов показывает тенденцию к увеличению по мере приближения к нормальной вспышке. Продолжение наблюдений в этом же году подтвердило наличие отрицательных сверхгорбов, средний период которых оказался равным $0^d.095952$. Авторы показали, что тенденция к увеличению периода отрицательных сверхгорбов к началу нормальной вспышки наблюдалась, по крайней мере, для двух циклов. [37]. Заметим, что интервал между нормальными вспышками при этом был 15-16 сут., что вдвое больше, чем в 2001г. В 2014г. Като и др. [38] впервые дали оценки отношению масс компонентов в данной системе: $q = 0.327$ и $q = 0.258$. В 2018г. была опубликована работа [36], делающая вывод об увеличении сверхцикла у данной звезды до 74 ± 0.5 дней.

Целью нашей работы является подробное изучение эволюции отрицательных сверхгорбов во время сверхцикла для нескольких сезонов наблюдений.

2. Наблюдения и редукция данных. Несколько кампаний по наблюдениям звезды MN Dra проводились в 2012-2017гг. в течение 152-х ночей на девяти телескопах без использования светофильтров. Информация о наблюдениях приведена в табл.1. Кампания 2012г. проходила с 3 июня по 19 ноября на телескопах АЗТ-11 (1.25-м, ПЗС ProLine PL23042) Крымской астрофизической обсерватории (КрАО), "Астротел" (30-см, ПЗС Apogee Alta 9000) Казанского Федерального Университета, ARCSAT (50-см, ПЗС APOGEE U-47UV) обсерватории Апаچی-Пойнт (США). Полученные наблюдения охватили 82 ночи. В 2013г. объект наблюдался в течение одной ночи на ЗТШ. В 2017г. наблюдения проходили с 28 апреля по 25 ноября в течение 63 ночей на телескопах К-380 (38-см, матрица APOGEE ALTA E47), АЗТ-11(1.25-м, матрица ProLine PL23042)

и ЗТШ (2.6-м, матрица APOGEE ALTA E47) КрАО, телескопе СКАС (28-см, матрица QSI 583wsg) Казанского Федерального Университета, телескопе АЗТ-8 (70-см, матрица FLI PL4710) наблюдательной станции в с. Лесники КНУ им. Тараса Шевченко, телескопах Zeiss 60 (60-см, матрица Fli-ML3041) и 18-см телескопе (18-см, матрица SBIG ST-10XME) наблюдательной станции в с. Стара Лесна Словацкой Академии Наук, телескопах Цейсс 60 (60-см, матрица Ap47p), АЗТ-5 (50-см, матрица Apogee Alta U16M) и ЗТЕ (1.25-м, матрица VersArray-1300) в п. Научный Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ. Качество наблюдательных условий, определявшееся по полуширине изображения звезды (FWHM), для большинства ночей было лучше 3".5.

Таблица 1а

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

Телескоп	Начало-конец наблюдений JD-2456000		Телескоп	Начало-конец наблюдений JD-2456000		Телескоп	Начало-конец наблюдений JD-2456000	
2012 год								
ARCSAT	082.7316	082.8401	ARCSAT	109.7768	109.9504	A3T-11	178.2494	178.3979
ARCSAT	085.7210	085.8464	ARCSAT	110.7863	110.9442	A3T-11	182.2387	182.3690
ARCSAT	086.7039	086.8267	ARCSAT	111.7785	111.8303	A3T-11	183.2742	183.4234
A3T-11	087.3102	087.3940	A3T-11	119.4392	119.5305	A3T-11	185.2174	185.3243
ARCSAT	087.7101	087.8408	A3T-11	121.3490	121.4453	A3T-11	187.2219	187.3224
A3T-11	088.2977	088.3019	A3T-11	130.3571	130.5509	Astrotel	203.2172	203.5897
ARCSAT	088.7007	088.8477	A3T-11	131.3008	131.4682	Astrotel	207.3530	207.5909
A3T-11	089.2874	089.3920	Astrotel	133.2431	133.3064	Astrotel	208.3475	208.4648
ARCSAT	089.7107	089.8362	Astrotel	134.2402	134.5267	Astrotel	211.2989	211.4871
ARCSAT	090.6996	090.8251	Astrotel	135.2546	135.5381	Astrotel	214.2129	214.5197
A3T-11	091.3086	091.4468	Astrotel	136.2462	136.3042	ARCSAT	226.5878	226.8011
ARCSAT	091.8160	091.9415	Astrotel	138.2446	138.3107	ARCSAT	227.5816	227.7960
A3T-11	092.3840	092.5158	Astrotel	140.3192	140.5225	ARCSAT	228.5504	228.7897
ARCSAT	092.8231	092.9437	Astrotel	142.2417	142.5435	ARCSAT	230.6901	230.8065
ARCSAT	093.8176	093.9442	Astrotel	143.3146	143.5178	ARCSAT	231.6157	231.7939
A3T-11	094.3191	094.3966	Astrotel	148.2870	148.4000	ARCSAT	232.5906	232.7725
A3T-11	095.2971	095.3955	Astrotel	152.2330	152.2852	ARCSAT	233.5975	233.7693
A3T-11	098.3308	098.4626	Astrotel	157.2709	157.5404	ARCSAT	235.5581	235.7875
A3T-11	099.2821	099.4140	Astrotel	160.3418	160.5559	ARCSAT	236.5718	236.7689
ARCSAT	099.7865	099.9457	Astrotel	162.4191	162.5030	ARCSAT	237.6026	237.7632
A3T-11	101.2994	101.3999	Astrotel	163.3481	163.5552	ARCSAT	238.6125	238.7910
ARCSAT	101.8009	101.9479	Astrotel	164.3272	164.3730	ARCSAT	240.6761	240.7696
A3T-11	102.3026	102.3989	Astrotel	165.3199	165.3783	ARCSAT	241.6335	241.6479
A3T-11	103.3278	103.3990	Astrotel	166.3182	166.5588	ARCSAT	243.5402	243.7413
ARCSAT	103.8369	103.9427	Astrotel	167.2770	167.5416	ARCSAT	245.5879	245.7663
ARCSAT	105.7937	105.9410	A3T-11	172.2505	172.3853	ARCSAT	251.5368	251.7127
ARCSAT	106.8030	106.9421	A3T-11	174.3262	174.4515			
ARCSAT	107.8002	107.9490	A3T-11	177.2540	177.3501			

Таблица 1b

Телескоп	Начало-конец наблюдений JD-2456000		Телескоп	Начало-конец наблюдений JD-2456000		Телескоп	Начало-конец наблюдений JD-2456000	
2017 год								
A3T-11	872.3866	872.5187	A3T-11	917.3226	917.5159	KFU	937.3274	937.5038
A3T-11	873.3987	873.5308	A3T-11	918.3310	918.3918	18см SL	937.4928	937.5441
A3T-11	874.3920	874.5283	A3T-11	920.2974	920.4001	KFU	938.3639	938.5113
A3T-11	875.4606	875.5437	A3T-11	921.3837	921.5033	18см SL	938.4675	938.4675
A3T-11	876.4163	876.5442	Zeiss 60	923.4867	923.5589	Zeiss 60	940.2881	940.2966
A3T-11	890.2972	890.5071	18см SL	924.3025	924.4847	A3T-11	945.3496	945.3581
ЗТШ	891.2792	891.5451	A3T-11	925.3143	925.5136	A3T-11	946.3060	946.3124
ЗТШ	892.2714	892.5391	K-380	926.3344	926.5006	A3T-11	948.2775	948.2860
A3T-11	893.3906	893.5314	18см SL	926.4129	926.5532	Zeiss 60	969.5778	969.5787
A3T-11	897.3600	897.3702	Zeiss 60	927.4650	927.4849	Zeiss 60	982.5705	982.5956
A3T-11	898.2945	898.5338	K-380	928.3890	928.3890	Zeiss 60	983.5471	983.5879
A3T-11	899.3637	899.4376	Zeiss 60	928.4927	928.5466	Zeiss 60	984.5018	984.5833
A3T-11	900.3718	900.5125	Zeiss 60	929.4570	929.5459	Zeiss 60	1022.5852	1022.5870
A3T-11	901.3487	901.5141	K-380	930.4051	930.5297	A3T-5	1070.3568	1070.4636
A3T-11	902.3702	902.5075	K-380	931.3287	931.3820	A3T-5	1071.3661	1071.3661
A3T-11	903.2869	903.4734	A3T-11	933.3498	933.3964	A3T-5	1072.1438	1072.1835
A3T-11	904.3219	904.4486	18см SL	933.5089	933.5544	A3T-5	1075.2020	1075.2429
A3T-11	905.3391	905.5325	A3T-11	934.2986	934.3177	Цейсс 60	1080.3402	1080.4903
A3T-11	906.2832	906.5342	Zeiss 60	934.4922	934.5597	Цейсс 60	1081.1864	1081.2381
A3T-11	908.4299	908.5108	A3T-11	935.3111	935.5047	Цейсс 60	1082.1528	1082.4748
A3T-11	912.3773	912.4864	A3T-11	936.3388	936.3769	Цейсс 60	1083.2772	1083.4195
A3T-8	915.3621	915.4892	18см SL	936.4961	936.5517	ЗТЕ	1085.1400	1085.2306
A3T-11	916.3022	916.3972	A3T-11	937.3211	937.3719	A3T-8	1101.3035	1101.3985

Наблюдательные данные проходили стандартный процесс обработки и калибровки в программе MaxIm DL. В качестве звезды сравнения, относительно которой проводилась фотометрия, использовалась звезда с координатами $20^{\text{h}}23^{\text{m}}35^{\text{s}}.358$, $+64^{\circ}36'56''.66$ из каталога USNO-A2.0 [39]. Для нее были получены величины $V=16^{\text{m}}.33$, $R=15^{\text{m}}.58$ [33].

3. *Вспышечные кривые блеска 2012 и 2017гг.* Наблюдения 2012г. покрывают интервал с JD = 2456082 по JD = 2456251 и содержат в себе 82 ночи наблюдений. За это время нами были зарегистрированы 4 нормальные вспышки, одна сверхвспышка и один фрагмент, предположительно относящийся ко второй сверхвспышке. В 2013г. наблюдения проводились в течение одной ночи. В 2017г. в интервале от JD = 2457872 до JD = 2458083, содержащем 63 ночи наблюдений, мы зарегистрировали 3 нормальные вспышки и 2 сверхвспышки (см. журнал наблюдений в табл.1a, b). Полученные вспышечные кривые представлены на рис.1.

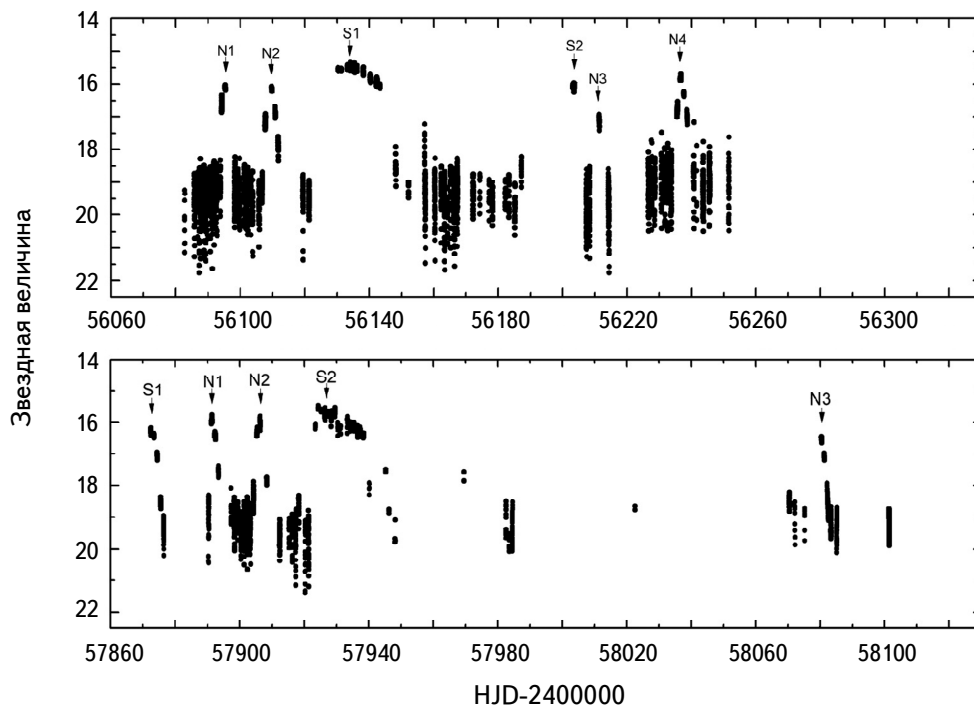


Рис.1. Вспышечные кривые блеска звезды MN Dra в 2012г. (вверху) и 2017г. (внизу). Буквой N обозначены нормальные вспышки, S - сверхвспышки.

К сожалению, покрытие 2012г. наблюдениями не позволяет нам сделать выводы о количестве нормальных вспышек, заключенных в одном сверхцикле. Мы можем только констатировать, что их не менее 2-х. Также в данном году не представляется возможным определить продолжительность сверхцикла системы из-за недостаточного количества наблюдений сверхвспышки S2. Мы также можем сказать, что в 2017г. наблюдалось не менее 2-х нормальных вспышек за сверхцикл. Величина сверхцикла определялась нами как ~ 65 сут., что больше, чем определенное в 2003г. значение длины сверхцикла ~ 60 дней [34], но меньше, чем значение 74 ± 0.5 сут., полученное в работе [36]. Во все годы наблюдений цикл держался на уровне ~ 15 сут., как и в 2009г. Продолжительность нормальных вспышек составила 3-4 дня, амплитуда 3-3.5 звездные величины для обоих годов наблюдений. Продолжительность сверхвспышки S2 в 2017г. составила 18 сут., а амплитуда сверхвспышек достигала $\sim 4^m$ в 2012 и в 2017гг.

4. *Кривые блеска.* Данные всех ночей наблюдений показывают короткопериодические колебания блеска, независимо от вспышечной активности системы. Примеры индивидуальных кривых блеска в разных состояниях системы представлены на рис.2. Амплитуды кривых изменяются от $0^m.06$ в

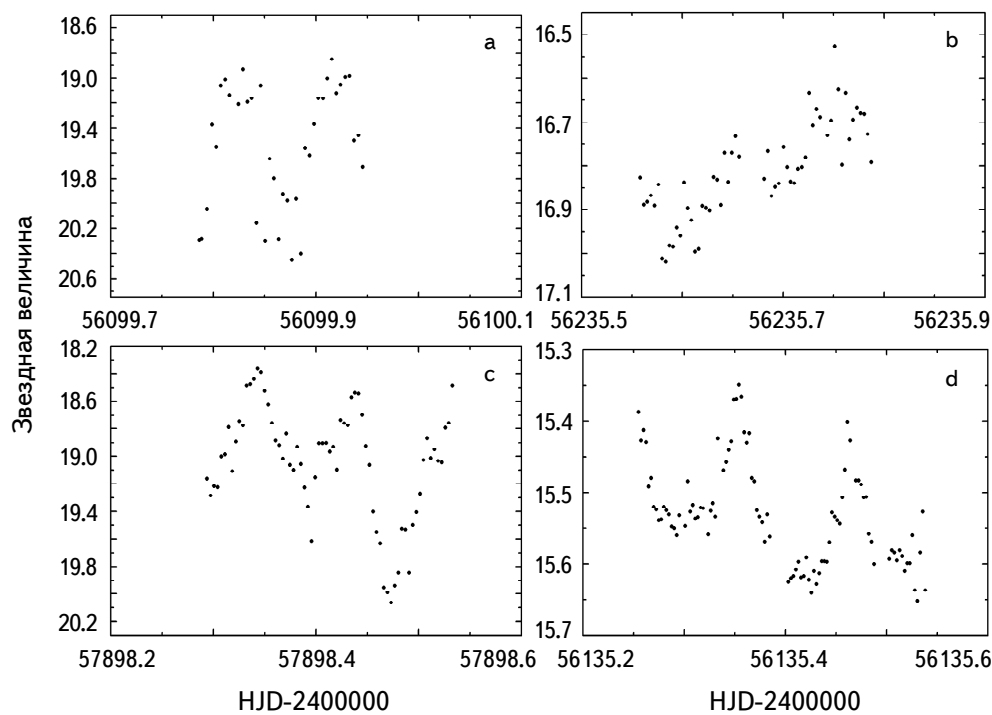


Рис.2. Примеры индивидуальных кривых блеска на разных этапах вспышечной активности. а) - в неактивном состоянии 2012г.; б) - в неактивном состоянии 2017г.; в) - во время нормальной вспышки 2012г.; д) - во время сверхвспышки 2012г.

нормальных вспышках до 2^m в неактивном состоянии между ними.

Нами было замечено ранее, что профиль кривых блеска отрицательных сверхгорбов чаще всего имеет асимметричную форму: подъем блеска более медленный, чем его падение. В этой связи интересна кривая блеска, полученная в 2013 г. (рис.3). Для нее характерно резкое увеличение блеска, его квазиостановка длительностью примерно в половину периода и такое же стремительное падение блеска (основной горб). Резкие возрастания и ослабления блеска происходили в среднем за 12 мин. со скоростью 0.06-0.08 зв. вел./мин. В интервале между соседними основными горбами наблюдался меньший вторичный горб, амплитуда которого возрастала от цикла к циклу. Данные, свернутые с периодом отрицательных сверхгорбов, показывают, что наличие вторичного горба в среднем формирует асимметричный профиль кривой блеска. Заметим, что Земко и др. [40] также сообщили о спорадических появлениях вторичного горба на кривых блеска карликовой новой типа SU UMa ER UMa.

5. Частотный анализ данных. Для частотного анализа мы разделим все данные на наблюдения, относящиеся к сверхвспышкам и наблюдения,

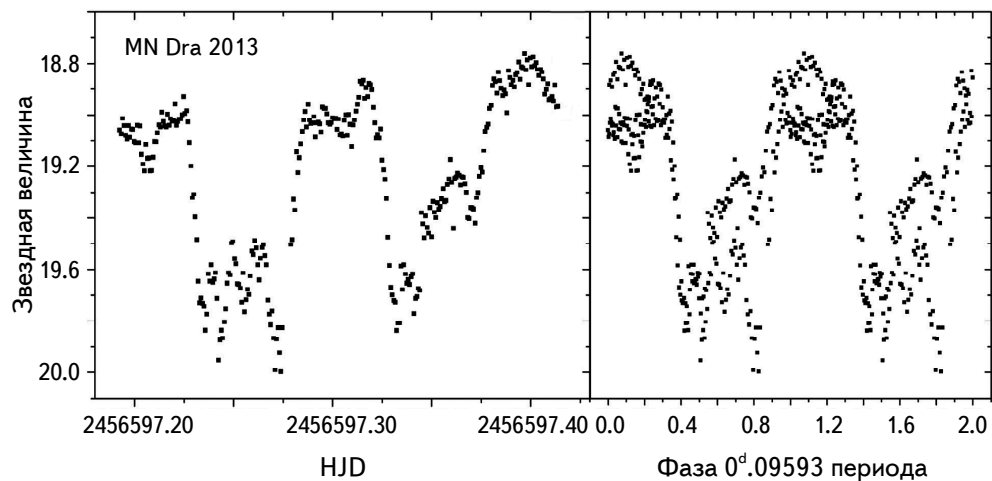


Рис.3. Пример необычной кривой блеска отрицательных сверхгорбов MN Dra (слева) и фазовая кривая для этих данных (справа). Из кривых видна повторяемость появления вторичного горба (но с разной амплитудой) от цикла к циклу в течение ночи.

относящиеся к спокойному состоянию и нормальным вспышкам. Данные разделения производились для 2012 и для 2017 годов.

Для уменьшения влияния зависимости амплитуды колебаний от яркости

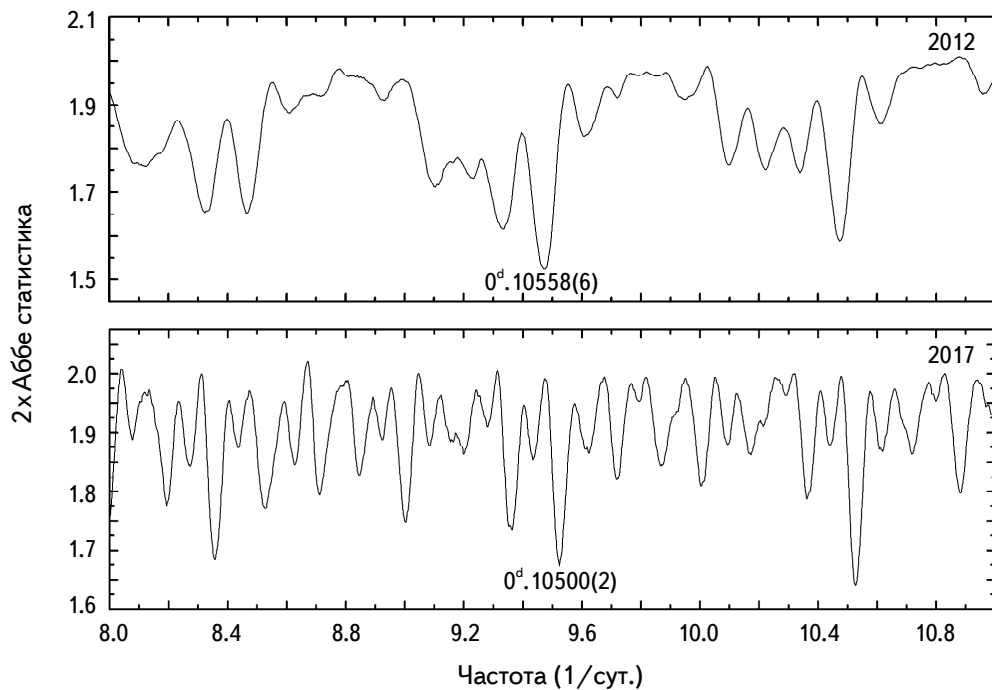


Рис.4. Периодограммы для данных во сверхвспышках.

ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ СВЕРХГОРБОВ 233

системы на статистический анализ временных рядов, данные были переведены в относительные интенсивности I согласно соотношению:

$$I = 10^{-0.4m} \times 10^7,$$

где m - звездная величина.

Для частотного анализа использовался реализованный в программе ISDA метод Стеллингверфа, являющийся одной из модификаций метода PDM (Phase Dispersion Minimization) [41]. Результат для сверхвысышек показан на рис.4.

5.1. Сверхвысышки 2012 и 2017гг. Самый сильный пик для наблюдений во время сверхвысышки 2012г. указывает на период $0^d.10558(6)$, а во время сверхвысышки 2017г. - на $0^d.10500(2)$. Мы интерпретируем их как средние периоды положительных сверхгорбов. Расхождение в значениях можно объяснить как разным покрытием сверхвысышек в 2012 и 2017 годах, так и возможными изменениями периода положительных сверхгорбов в течение сверхвысышек.

При помощи комбинирования метода совмещения хорошо прописанного профиля сверхгорба с изучаемой кривой блеска и метода хорд, нами были определены моменты максимумов для всех ночей, где это было возможно. Полученные моменты и амплитуды максимумов для сверхвысышек приведены в табл.2. Подробный анализ изменений О-С во время сверхвысышки 2012г. дан в работе Като и др. [38].

Периодограммы для спокойного состояния и нормальных высышек представлены на рис.5.

Таблица 2

МОМЕНТЫ МАКСИМУМОВ СВЕРХГОРБОВ (HJD) И ИХ
АМПЛИТУДЫ ДЛЯ СВЕРХВЫСЫШЕК 2012 И 2017гг.

HJD-2400000	Амплитуда колебания (зв. величины)	HJD-2400000	Амплитуда колебания (зв. величины)
2012 год			
56130.4398	0.0630	56135.4651	0.2015
56130.5278	0.0684	56138.2351	0.1738
56131.4242	0.0597	56140.4070	0.1695
56133.2965	0.1192	56142.5072	0.1787
56134.2773	0.1992	56143.4612	0.1074
56134.5012	0.1855	56148.3680	0.4903
56135.3535	0.1809		
2017 год			
57872.4497	0.121	57924.4093	0.078
57873.5015	0.101	57925.3744	0.050
57874.4470	0.121	57926.4938	0.094
57875.4997	0.234	57929.5170	0.166
57876.4561	0.565	57935.4134	0.159

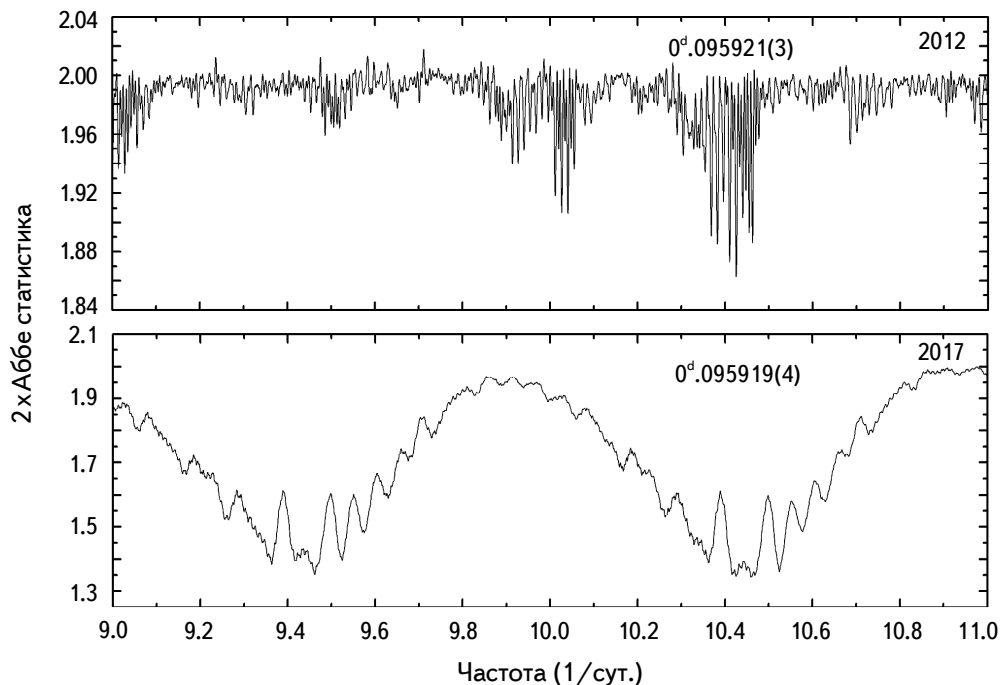


Рис.5. Периодограммы для данных в спокойном состоянии и нормальных всплесков для 2012г. (вверху) и 2017г. (внизу). Частотный анализ проводился по всем имеющимся данным.

5.2. Неактивное состояние и нормальные всплески 2012-2017гг.

Наиболее сильным сигналом для данных 2012г. в неактивном состоянии является период $0^d.095921(3)$, который совпадает со средней величиной периода отрицательных сверхгорбов [35]. На периодограмме для 2017г. данный период также доминирует (пик на $0.095919(4)$ сут.).

Обратим внимание, что на периодограммах обоих сезонов наблюдений пик, центрированный на частоту периода отрицательных сверхгорбов, расщеплен на более мелкие пики. Такое расщепление может быть вызвано тем, что этот период претерпевает изменения на шкале наблюдений, что было замечено для этого объекта ранее [35]. Анализ возможных изменений периода был проведен нами с помощью метода О-С для максимумов кривых блеска.

Полученные моменты и амплитуды максимумов для спокойного состояния и нормальных всплесков приведены в табл.3.

Используя периоды отрицательных сверхгорбов для каждого года наблюдений и моменты максимумов отрицательных сверхгорбов, мы получаем значения О-С для всех ночей, где это возможно. Полученные диаграммы представлены на рис.6 (2012г.) и рис.7 (2017г.).

Поведение амплитуды отрицательных сверхгорбов показывает одинаковую

ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ СВЕРХГОРБОВ 235

Таблица 3

МОМЕНТЫ МАКСИМУМОВ (HJD) И ИХ АМПЛИТУДЫ ДЛЯ СПОКОЙНОГО СОСТОЯНИЯ И НОРМАЛЬНЫХ ВСПЫШЕК

HJD-2400000	Амплитуда колебания (зв. величины)	HJD-2400000	Амплитуда колебания (зв. величины)
2012 год			
56082.8057	1.5755	56166.4232	1.9924
56085.7851	1.603	56166.5226	2.0659
56086.7572	1.5024	56167.3866	1.4395
56087.3366	1.3617	56167.4853	1.4733
56087.8132	1.3337	56172.2681	1.1455
56088.7762	1.8237	56172.3579	1.3321
56089.3526	1.3331	56174.363	0.9531
56089.7418	1.7724	56177.3248	0.8035
56090.8022	1.1254	56178.2909	0.7344
56091.3811	1.6564	56182.3146	0.5904
56091.8646	1.602	56183.3875	0.9475
56092.4512	1.3854	56185.3043	0.9783
56092.9284	0.945	56187.3118	0.6497
56093.8955	0.9188	56207.5454	1.5859
56094.3935	0.0911	56208.3941	1.9989
56095.3345	0.0575	56211.3548	0.1811
56098.3968	1.3487	56211.4593	0.1979
56099.3538	1.0011	56214.2421	1.6874
56099.9182	1.2155	56214.3418	1.8994
56101.3552	1.1409	56214.4358	1.9076
56101.8384	1.1285	56226.6402	1.7186
56102.3178	1.37	56226.7439	1.7563
56103.3644	1.1843	56228.6464	1.4611
56103.9458	1.0341	56230.7577	1.6761
56105.8638	1.2887	56231.7222	1.5368
56106.8184	0.7398	56232.6745	1.7048
56106.9158	0.7398	56233.6411	1.7371
56107.8702	0.2943	56233.7341	1.72
56109.8816	0.0846	56235.6534	0.2014
56110.8403	0.175	56235.7546	0.177
56111.7921	0.4973	56236.6106	0.0729
56121.3466	1.0108	56236.7143	0.0757
56121.4377	0.9212	56237.6677	0.1045
56157.3838	1.4401	56238.7097	0.2086
56157.4779	1.4763	56240.7256	1.4948
56160.4536	1.9051	56243.5831	1.5963
56162.4716	1.2784	56243.6749	1.8094
56163.4396	1.9191	56245.6828	1.78
56163.5351	1.8327	56251.621	1.962
56165.3635	2.0625		

Таблица 3 (окончание)

2017 год			
57890.3925	0.965	57917.4975	2.0597
57891.3516	0.06	57918.3525	0.778
57891.4551	0.147	57920.3693	2.535
57892.3102	0.154	57921.4194	1.175
57892.4107	0.127	57982.566	0.952
57892.5025	0.146	57984.5747	1.219
57893.4533	0.091	58070.4265	0.533
57898.3416	0.737	58072.1510	1.278
57898.4306	0.869	58080.4284	0.084
57899.3948	0.679	58081.1984	0.187
57900.4483	0.923	58082.2462	0.275
57901.4065	1.109	58082.3443	0.432
57902.4643	1.033	58082.4401	0.436
57903.3388	1.154	58083.2980	0.729
57904.3866	0.636	58083.3911	0.759
57905.4516	0.1055	58085.2119	0.693
57906.5018	0.1625	58101.3190	0.813
57908.4973	0.1893	58101.4015	1.045
57916.3363	1.2478		

зависимость во всех стадиях вспышечной активности: рост амплитуды в спокойном состоянии, падение во время вспышек.

Диаграммы О-С для 2012 и 2017гг. показывают непрерывное изменение периода отрицательных сверхгорбов во время всего сверхцикла. Это изменение носит циклический характер между нормальными вспышками. Для хорошо охваченных наблюдениями циклов в окрестности нормальных вспышек на JD 2456095, 2456211, 2456236, 2457891, 2457906 и, вероятно, пропущенной вспышки в промежутке JD 2456167-2456172, видно, что ход О-С резко изменяется во время нормальных вспышек. В спокойном состоянии между вспышками О-С постепенно увеличиваются, что соответствует увеличению периода отрицательных сверхгорбов, а во время самой вспышки период быстро уменьшается. Заметим, что точки диаграммы О-С, лежащие на JD=2456121, можно перенести на один период в верхнюю часть диаграммы, так как существует неоднозначность, вызванная возможным просчетом циклов.

Такой же характер изменения отрицательных сверхгорбов был отмечен Осаки и Като [31] для карликовой новой V1504 Cyg по данным космического телескопа Кеплер. Кроме того, О-С показывают тенденцию к уменьшению среднего периода отрицательных сверхгорбов в течение сверхцикла, как было продемонстрировано для V1504 Cyg [31] и ER UMa [42]. Результаты периодограммного анализа MN Dra находятся в согласии с выводами анализа О-С. На рис.8

для примера представлены периодограммы для рядов наблюдений в 2017г. во время одной из вспышек и в спокойном состоянии. Согласно периодограммам, период отрицательных сверхгорбов во время вспышки был 0.0951 сут., а к концу спокойного состояния он увеличился до 0.0961 сут.

По упрощенной модели Ларвууда [15] для ретроградной прецессии наклон-

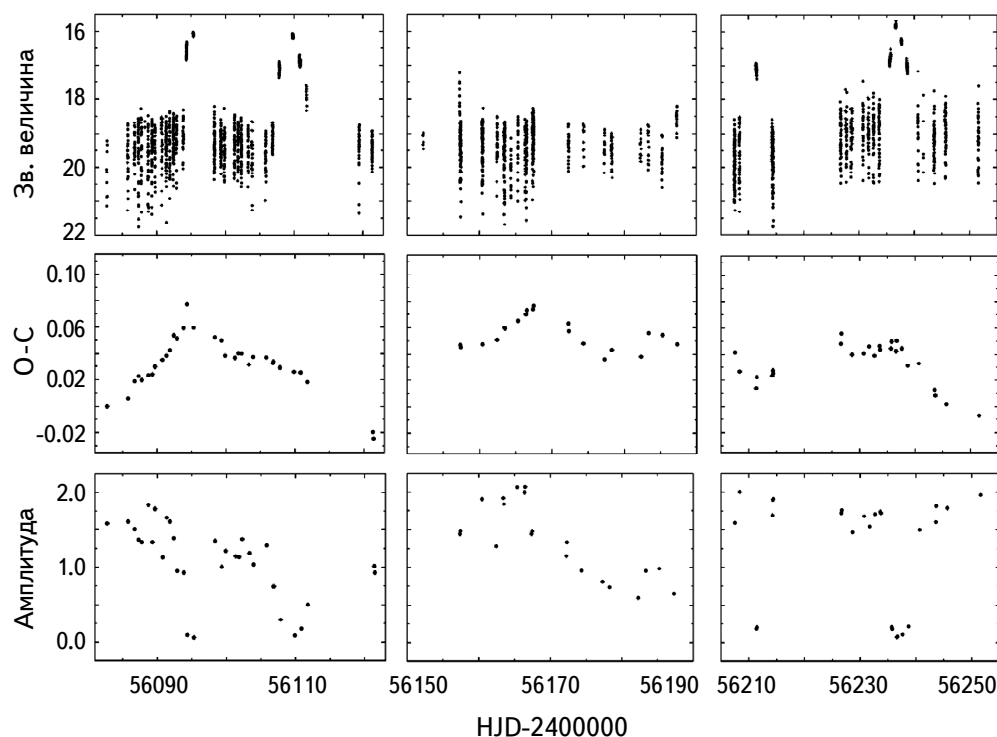


Рис.6. Сверху вниз: общая кривая блеска; диаграмма О-С; кривая изменения амплитуды сверхгорбов для трех сетов 2012г. Большой разброс данных в минимуме в отдельные ночи обусловлен уменьшением точности наблюдений из-за малого размера телескопа и/или погодных условий.

ного диска радиус диска обратно пропорционален периоду отрицательных сверхгорбов. В рамках этой модели картина изменений О-С MN Dra соответствует расширению аккреционного диска во время нормальной вспышки и постепенному его уменьшению в спокойном состоянии. При этом средний радиус аккреционного диска растет с ростом фазы сверхцикла. Такие изменения как раз предсказаны теорией термо-приливной неустойчивости аккреционного диска [43].

6. Выводы. Были проведены две кампании по наблюдениям карликовой новой MN Dra в 2012-2017гг. на девяти телескопах в течение 152-х ночей и наблюдения в течение одной ночи в 2013г. Наблюдениями были охвачены

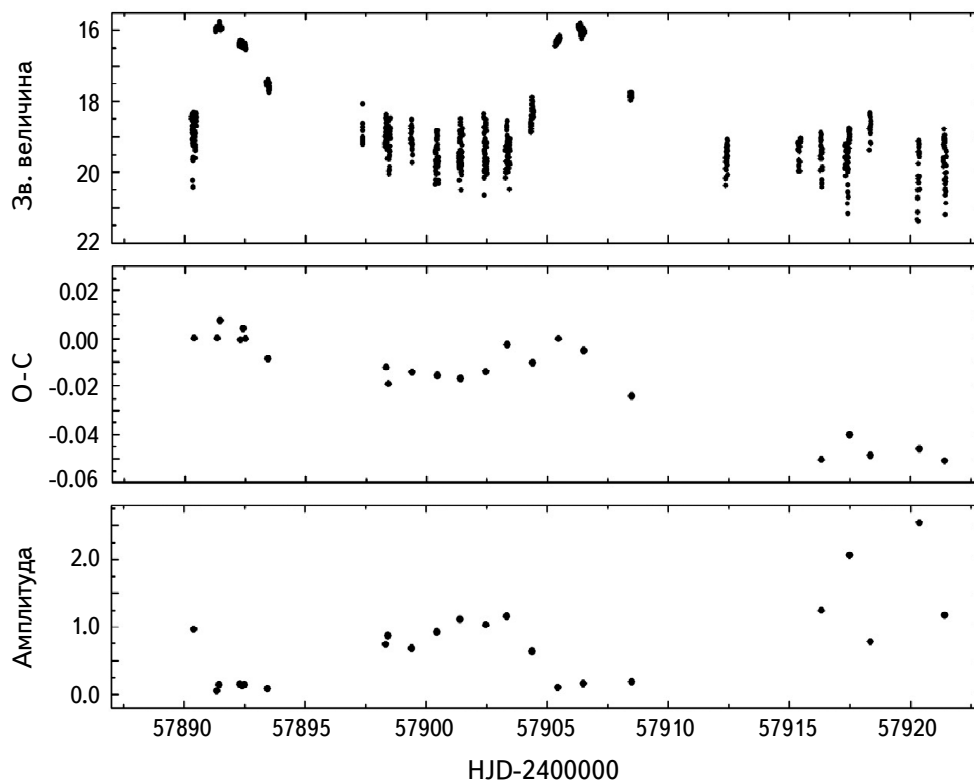


Рис.7. Сверху вниз: часть общей кривой блеска за 2017г; диаграмма О-С для максимумов отрицательных сверхгорбов; кривая изменения их амплитуды.

четыре сверхвыпрыжки и семь нормальных вспышек, а также спокойное состояние между ними.

Мы исследовали вспышечную активность системы и выявили, что для 2017г. интервал между соседними сверхвыпрыжками составил 65 сут., а между соседними нормальными вспышками - 15 сут.

Как и в 2009г., 2012 и 2017гг. MN Dra во время сверхвыпрышек показывала положительные сверхгорбы, а в спокойном состоянии и в нормальных вспышках - отрицательные. Средний период положительных сверхгорбов для 2012г. оказался равным 0.10558(6) сут., а в 2017 - 0.10500(2) сут.

Периодограммный анализ и анализ О-С максимумов блеска отрицательных сверхгорбов показал циклическое изменение периода сверхгорбов от одной нормальной вспышки к другой. В спокойном состоянии О-С постепенно увеличиваются, что соответствует увеличению периода отрицательных сверхгорбов, а во время самой вспышки период быстро уменьшается.

В рамках упрощенной модели наклонного диска [15], такие изменения О-С могут соответствовать расширению аккреционного диска во время нор-

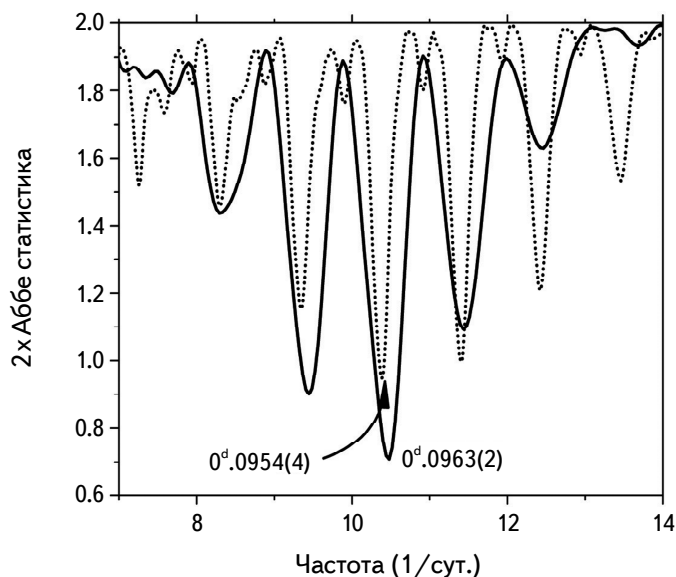


Рис.8. Периодограммы для данных 2017г. во вспышке N1 (две ночи в интервале JD = 2457891.45-2457892.46, сплошная линия) и в спокойном состоянии (четыре ночи в интервале JD = 2457900.45-2457903.49, точечная линия).

мальной вспышки и постепенному его уменьшению в спокойном состоянии, что как раз находится в соответствии с теорией термо-приливной неустойчивости аккреционного диска [43].

Работа выполнена при частичном финансировании грантами РФФИ18-32-00371, APVV-15-0458 и 2/008/17.

Данная работа была частично поддержана субсидией Правительства РФ, направленной на повышение конкурентоспособности Казанского федерального университета среди мировых научно-исследовательских центров.

Работа частично выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (3.9780.2017/8.9).

Работа выполнена с использованием наблюдений, полученных на Северо-кавказской астрономической станции КФУ.

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

² Крымская астрофизическая обсерватория, Крым,
e-mail: epravlenko@gmail.com

³ Обсерватория Апачи Пойнт, Университет Нью Мехико, США

⁴ Астрономический институт Словацкой АН, Словакия

⁵ Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга,
МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

⁶ Киевский Национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина

VARIATIONS OF THE PERIOD OF NEGATIVE SUPERHUMPS IN SU UMa-TYPE DWARF NOVAE. I. MN Dra (2012-2017)

A.S.SKLYANOV¹, E.P.PAVLENKO², K.A.ANTONYUK², N.V.PIT²,
V.P.MALANUSHENKO³, A.V.SHCHUROVA⁴, A.-M.A.ZAOSTROZHNYKH¹,
S.Yu.SHUGAROV⁴, A.A.SOSNOVSKIY², Ju.V.BABINA², O.I.ANTONYUK²,
A.O.SIMON⁵, R.Ya.ZHUCHKOV¹, A.G.GUTAEV¹

We present the results of photometric study of dwarf nova MN Dra, conducted in 2012-2017 on 9 telescopes spanning 152 nights. In total, observations covered 4 superoutbursts, 7 normal outbursts and quiescent state in between them. Interval between consequent superoutbursts in 2017 was 65 days, between consequent normal outbursts - 15 days. During superoutbursts in 2012 and 2017 positive superhumps were observed with mean periods 0.10558(6) and 0.10500(2) days respectively, in quiescent state negative superhumps with mean period of 0.095921(3) days were recorded. It was shown, that period of negative superhumps cyclically changed between normal outbursts: sharply decreased during the outburst and gradually increased until the beginning of the next outburst. Such pattern of negative superhump period variation can correspond to quick increase of accretion disc radius during the outburst and its gradual decrease afterwards, which agrees with thermal-tidal instability theory.

Keywords: *MN Dra: cataclysmic variables: negative superhumps: negative superhump evolution: accretion*

ЛИТЕРАТУРА

1. *B.Warner*, *Astrophys. Space Sci.*, **226**, 187, 1995.
2. *C.Knigge*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **373**, 484, 2006.
3. *Y.Osaki*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **108**, 39, 1996.
4. *T.Kato, A.Imada, M.Uemura et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **61**, S395, 2009.
5. *D.Harvey et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **107**, 551, 1995.
6. *J.Patterson et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **109**, 468, 1997.
7. *M.A.Wood, C.J.Burke*, *Astrophys. J.*, **661**, 1042, 2007.
8. *P.Barrett, D.O'Donoghue, B.Warner*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **233**, 759, 1988.
9. *P.Barrett, D.O'Donoghue, B.Warner*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **236**, 735, 1989.
10. *S.B.Foulkes, C.A.Haswell, J.R.Murray*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **366**, 1399, 2006.

11. *J.Smak*, *Acta Astronomica*, **59**, 419, 2009.
12. *M.M.Montgomery*, *Astrophys. J. Lett.*, **745**, L25, 2012.
13. *M.M.Montgomery*, *Astrophys. J. Lett.*, **753**, L27, 2012.
14. *J.D.Larwood*, *R.P.Nelson*, *J.C.B.Papaloizou et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **282**, 597, 1996.
15. *J.Larwood*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **299**, L32, 1998.
16. *S.H.Lubow*, *Astrophys. J.*, **398**, 525, 1992.
17. *J.R.Murray*, *P.J.Armitage*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **300**, 561, 1998.
18. *S.Horn*, *W.Kundt*, *Astrophys. Space Sci.*, **158**, 205, 1989.
19. *P.R.Maloney*, *M.C.Begelman*, *J.E.Pringle*, *Astrophys. J.*, **472**, 582, 1996.
20. *P.R.Maloney*, *M.C.Begelman*, *Astrophys. J.*, **491**, L43, 1997.
21. *P.R.Maloney*, *M.C.Begelman*, *M.A.Nowak*, *Astrophys. J.*, **504**, 77, 1998.
22. *G.I.Ogilvie*, *G.Dubus*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **320**, 485, 2001.
23. *J.E.Pringle*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **281**, 357, 1996.
24. *R.A.M.J.Wijers*, *J.E.Pringle*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **308**, 207, 1999.
25. *J.R.Murray*, *D.Chakrabarty*, *G.A.Wynn et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **335**, 247, 2002.
26. *D.Lai*, *Astrophys. J.*, **524**, 1030, 1999.
27. *H.P.Pfeiffer*, *D.Lai*, *Astrophys. J.*, **604**, 766, 2004.
28. *M.M.Montgomery*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **394**, 1897, 2009.
29. *T.Ohshima et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **64**, L3, 2012.
30. *T.Ohshima et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **66**, 67, 2014.
31. *Y.Osaki*, *T.Kato*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **65**, 95, 2013.
32. *M.Still et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **717**, L113, 2010.
33. *S.V.Antipin*, *E.P.Pavlenko*, *Astron. Astrophys.*, **391**, 565, 2002.
34. *D.Nogami*, *M.Uemura*, *R.Ishioka et al.*, *Astron. Astrophys.*, **404**, 1067, 2003.
35. *E.P.Pavlenko et al.*, *Astron. Rep.*, **54**, 6, 2010.
36. *K.Bakowska et al.*, *Astron. Astrophys.*, **603**, 72, 2017.
37. *E.P.Pavlenko et al.*, *AIP Conference Proceedings*, **1273**, 320, 2010.
38. *T.Kato et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **66**, 90, 2014.
39. *D.Monet et al.*, *USNO-A2.0, A Catalog of Astrometric Standards (U.S. Naval Observatory, Washington, DC)*, 1998.
40. *P.Zemko*, *T.Kato*, *S.Shugarov*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **65**, 54, 2013.
41. *R.F.Stellingwerf*, *Astrophys. J.*, **224**, 953, 1978.
42. *P.Zemko*, *S.Shugarov*, *T.Kato et al.*, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, **43**, 319, 2014.
43. *Y.Osaki*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **41**, 1005, 1989.