

ОЦЕНКИ РАДИУСА АККРЕЦИОННОГО ДИСКА
КАРЛИКОВОЙ НОВОЙ ПЕГАСА 2010П.О.ЗЕМКО^{1,2,3}, Т.КАТО³

Поступила 5 января 2013

Принята к печати 1 марта 2013

Статья посвящена оценкам изменения величины радиуса аккреционного диска карликовой новой типа WZ Sge - OT J213806.6+261957. Расчеты основывались на фотометрических наблюдениях объекта во время сверхвспышки, начавшейся 6-го мая 2010г. Вскоре после максимума, на кривой блеска OT J2138 появились сверхгорбы, наличие которых характерно для звезд типа WZ Sge. Фотометрические наблюдения объекта в период с 15 мая по 2 декабря 2010г. обнаружили изменение периода сверхгорбов и, таким образом, позволили проследить изменения радиуса аккреционного диска в течение сверхвспышки в рамках модели приливной неустойчивости аккреционных дисков карликовых новых звезд. В статье показано, что радиус аккреционного диска может превышать не только радиус резонанса 3:1, но и радиус приливного воздействия вторичного компонента.

Ключевые слова: *звезды: фотометрия: двойные системы: карликовые новые*

1. *Введение.* Карликовые новые являются подклассом катаклизмических переменных звезд - полуразделенных тесных двойных систем, известных своим активным вспышечным поведением. В таких системах вещество перетекает через внутреннюю точку Лагранжа со вторичного компонента - красного или коричневого карлика на первичный - белый карлик. Карликовые новые, в которых кроме обыкновенных вспышек происходят сверхвспышки, отличающиеся большей амплитудой и продолжительностью, относятся к звездам типа SU UMa [1,2]. Другой, хорошо известной характеристикой этих звезд, является наличие колебаний на кривой блеска, обычно возникающих около максимума сверхвспышки, но иногда, присутствующих постоянно, вызванных прецессией аккреционного диска. Если период этих колебаний больше, чем орбитальный период системы, такие колебания называются "положительными сверхгорбами" и связаны с прецессией эллиптического аккреционного диска на радиусе резонанса 3:1 (радиус, на котором период обращения пробной частицы в аккреционном диске равен одной трети орбитального периода) [3-6]. Звезды типа WZ Sge являются подклассом карликовых новых типа SU UMa и характеризуются крайне продолжительным характерным временем появления сверхвспышек (порядка нескольких десятилетий) и редкими, или вовсе отсутствующими обыкновенными вспышками.

Сверхгорбы у звезд типа WZ Sge обычно эволюционируют от "ранних сверхгорбов" с двугорбым профилем и близким к орбитальному периодом [7], появляющихся около максимума сверхвспышки, к "обыкновенным сверхгорбам" с одногорбым профилем и постепенно увеличивающимся периодом, на несколько процентов превышающим орбитальный. В некоторых системах, кроме того, наблюдаются поздние сверхгорбы, поведение которых довольно разнообразно. Так, "традиционные" поздние сверхгорбы появляются со сдвигом по фазе на 0.5 периода. Считалось, что данная модуляция возникает из-за того, что в эллиптическом аккреционном диске гравитационный потенциал между точкой Лагранжа L1 и горячим пятном на диске меняется в течение орбитального периода. Такая вариация приводит к периодическому увеличению блеска горячего пятна, и, соответственно, модуляции кривой блеска [8]. Тем не менее, сдвиг по фазе на 0.5 периода наблюдается далеко не у всех звезд типа WZ Sge. В большинстве случаев период поздних сверхгорбов близок по величине к минимальному периоду обыкновенных сверхгорбов, однако у некоторых объектов поздние сверхгорбы, наоборот, возникают с необычно большим периодом. Като [9] предположил, что в таких звездах типа WZ Sge (GW Lib, V455 And и самой WZ Sge) поздние сверхгорбы вызваны прецессией диска на радиусе, близком к радиусу приливного воздействия.

Принято считать, что сверхгорбы связаны с прецессией диска, радиус которого равен радиусу резонанса 3:1, тем не менее, многочисленные наблюдательные факты, такие как постепенно увеличивающийся период обыкновенных сверхгорбов, эхо-вспышки и, упомянутые выше поздние сверхгорбы с большим периодом, указывают на то, что радиус аккреционного диска может превосходить радиус резонанса 3:1 в системах с низким отношением масс компонентов [9-13]. В данной статье мы приводим оценки радиуса аккреционного диска, подтверждающие, что в силу крайне продолжительного интервала времени между сверхвспышками и, соответственно, большого количества накопленного вещества в аккреционном диске, его радиус может превосходить не только радиус резонанса 3:1, но и радиус приливного воздействия вторичного компонента.

1.1. *O-C диаграммы для звезд типа SU UMa.* Для звезд типа SU UMa диаграмма O-C, построенная для периода сверхгорбов, обычно имеет три стадии: А - ранняя эволюционная стадия с длинным периодом сверхгорбов, В - промежуточная стадия с систематически меняющимся периодом сверхгорбов, характеризующая так называемые "обыкновенные" сверхгорбы (в это время обычно наблюдается параболическое изменение величины O-C на соответствующей диаграмме) и стадия С, финальная стадия, обычно с относительно коротким стабильным периодом. Ранние сверхгорбы у звезд типа WZ Sge наблюдаются в начале сверхвспышки,

перед стадией А. Долгое время считалось, что у звезд типа SU UMa период обычных сверхгорбов на стадии В может только уменьшаться, однако обширный наблюдательный материал, накопленный за последние годы, показал, что у многих карликовых новых типа SU UMa сверхгорбы эволюционируют от короткого периода к длинному в течение стадии В [10-13]. Единственное существующее на сегодняшний день объяснение данного феномена заключается в распространении так называемой "эксцентрической" волны [14] по аккреционному диску от центральных областей к внешним [15,16]. Радиус, рассчитанный в течение данной стадии, характеризует не фактический радиус диска, а эффективный радиус его эксцентрической части.

1.2. *Карликовая новая Пегаса 2010*. ОТ J213806+261957 (в дальнейшем ОТ J2138) была обнаружена в момент ее сверхвспышки, 6-го мая 2010г. и была классифицирована как звезда типа WZ Sge [11,17]. Для оценок радиуса аккреционного диска данного объекта мы использовали результаты фотометрических наблюдений, проводимых в обсерватории Терскол (Россия), обсерватории Астрономического Института Словацкой Академии Наук (Стара Лесна, Словакия) и в Крымской лаборатории Государственного Астрономического Института им. Штернберга (п. Научный, Украина). Подробный анализ фотометрических наблюдений представлен в работе [17]. Результаты наблюдений ОТ J2138 также представлены в

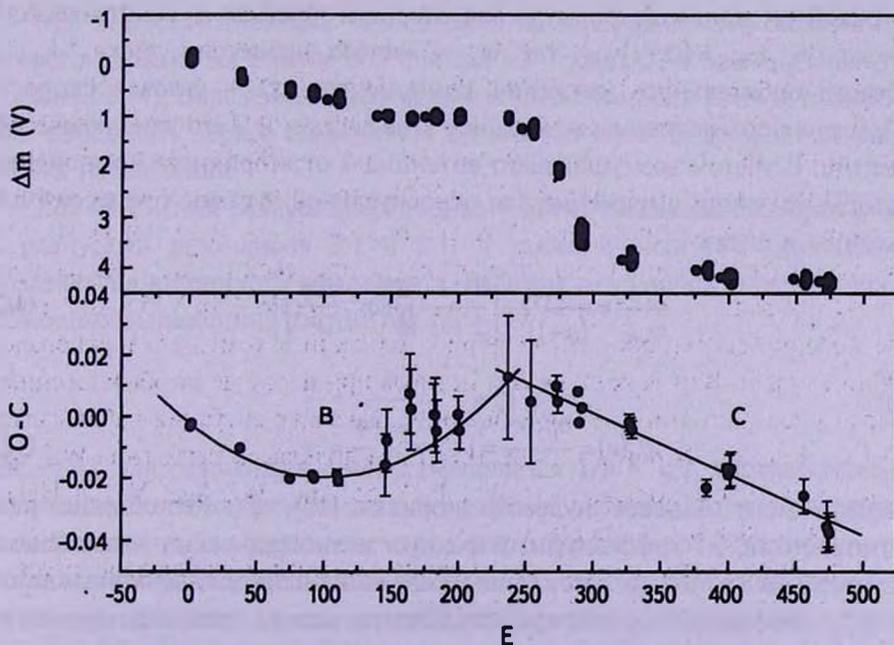


Рис.1. Кривая блеска карликовой новой ОТ J2138 в полосе V в относительных величинах (верхний график) и диаграмма O-C для сверхгорбов (нижний график), построенные в зависимости от номера цикла (из статьи [17]).

работе [11].

На рис.1 представлены зависимости хода остаточных отклонений О-С для сверхгорбов и кривая блеска карликовой новой OT J2138, где за нулевую звездную величину условно принята величина переменной во время вспышки. По оси абсцисс отложен номер цикла. Диаграмма О-С объекта имеет вид довольно характерный для карликовых новых типа SU UMa. Видно, что период сверхгорбов сначала увеличивался (стадия В - параболическая зависимость на нижнем графике рис.1), затем, во время резкого спада на кривой блеска, скачкообразно изменился, став стабильным и очень близким по значению к тому, что наблюдался в начале стадии В. Данное изменение соответствует переходу к сверхгорбам стадии С, которые на диаграмме О-С отражены линейной зависимостью. В связи с тем, что наши наблюдения начались только на 9-й день после сверхвспышки, они не покрывают стадию А сверхгорбов. Тем не менее, Мюррей [18] показал, что на стадии А происходит установление колебаний, и наблюдаемые в это время сверхгорбы не несут информации о радиусе аккреционного диска.

Мы опустили в наших расчетах стадию А и, используя результаты проведенных фотометрических наблюдений, оценили радиус диска на стадиях В и С в рамках динамической модели прецессии эллиптического аккреционного диска.

2. *Оценки радиуса аккреционного диска.* В своей работе Хирое и Осаки [4] приводят формулу для скорости прецессии эллиптического диска: $\omega_p/\omega_{orb} = (\Omega+1) - \kappa$, где ω_p - частота прецессии диска, ω_{orb} - частота орбитального движения компонентов, Ω - угловая скорость обращения потока плазмы на внешнем крае диска и κ - его эпициклическая частота. С учетом возмущающего потенциала от вторичного компонента, авторы получили выражение для относительной частоты прецессии для частицы в диске:

$$\frac{\omega_p}{\omega_{orb}} = \frac{\eta q}{(q+1)^{1/2}} \left[\frac{1}{2} \frac{1}{r^{1/2}} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dB_0}{dr} \right) \right], \quad (1a)$$

где

$$B_0(r) = \frac{b_{1/2}^{(0)}(r)}{2} = 1 + \frac{1}{4}r^2 + \frac{9}{64}r^4 + \dots \quad (16)$$

коэффициент Лапласа нулевого порядка [19], q - отношение масс компонентов, r - эффективный радиус эксцентрической части диска, измеряемый в единицах расстояния между компонентами двойной системы, а η - коэффициент пропорциональности между частотой прецессии реального газового аккреционного диска и его модельным представлением, который находится из наблюдений.

Период сверхгорбов есть суперпозиция орбитального периода и периода

прецессии диска и выражается уравнением:

$$\frac{1}{P_{sh}} = \frac{1}{P_{orb}} - \frac{1}{P_{prec}}, \quad (2)$$

где $P_x = 2\pi/\omega_x$, а P_{prec} , P_{sh} и P_{orb} - период прецессии, сверхгорбов и орбитальный период, соответственно. Подставляя уравнение (16) в уравнение (2) и, оставляя первые три члена разложения в коэффициенте Лапласа, получим следующее выражение:

$$\frac{P_{sh} - P_{orb}}{P_{sh}} \eta \frac{q}{2\sqrt{q+1}} \left(\frac{45}{16} r^{7/2} + \frac{3}{2} r^{3/2} \right). \quad (3)$$

Решая уравнение (3) относительно r , можно определить изменение радиуса аккреционного диска по изменению периода сверхгорбов.

В качестве необходимой для расчетов величины орбитального периода, был взят вероятный период, определенный Като [11] - $P_{orb} = 0.054523(4) d$.

Период сверхгорбов может быть определен из диаграммы О-С с помощью следующего соотношения:

$$P_{sh} = P_{0sh} + \frac{dP_{sh}}{dE} \times E, \quad (4)$$

где P_{0sh} есть средний период, используемый для построения диаграммы (в нашем случае он равен $P_{0sh} = 0.055106 d$), E - номер цикла, а dP_{sh}/dE - угол наклона касательной к графику на диаграмме О-С.

Мы аппроксимировали зависимость на диаграмме О-С полиномом второго порядка на стадии В и прямой на стадии С, и затем, используя уравнение (4), определили период сверхгорбов. Данный подход позволил нам определять период сверхгорбов для любого момента времени с начала наших наблюдений.

Ход изменений радиуса аккреционного диска исследовался в сравнении с радиусами резонансов 3:1 и 2:1, а также с радиусом приливного воздействия вторичного компонента. Радиусы резонансов определялись с помощью выражения, взятого из [2]:

$$\frac{r}{a} = \left(\frac{P}{P_{orb}} \right)^{2/3} (1+q)^{-1/3}, \quad (5)$$

где P/P_{orb} для резонансов 3:1 и 2:1 равняется 1/3 и 1/2, соответственно, a - расстояние между компонентами в двойной системе. Радиус приливного воздействия приближенно есть максимальный радиус орбит частиц кеплеровского аккреционного диска, не пересекающихся друг с другом из-за влияния вторичного компонента. Данный радиус рассчитывался, исходя из выражения, взятого из [2]:

$$\frac{r_{tidal}}{a} = \frac{0.6}{1+q}. \quad (6)$$

Таким образом, кроме радиуса диска, у нас осталось два неизвестных параметра в уравнении (3): отношение масс компонентов - q и коэффициент пропорциональности - η . Для того, чтобы определить величину q , мы применили метод калибровки уравнения (3), предположив, что сверхгорбы, наблюдающиеся на стадии С, возникают из-за прецессии аккреционного диска на радиусе резонанса 3:1. Далее, используя уравнения (3) и (5), мы получили:

$$r^{7/2} + \frac{8}{15} r^{3/2} = \frac{32\sqrt{q+1}}{45q\eta} \frac{P_{shC} - P_{orb}}{P_{shC}}, \quad (7)$$

где

$$\frac{r}{a} = \left(\frac{1}{3}\right)^{2/3} (1+q)^{-1/3}, \quad (8)$$

а P_{shC} - период сверхгорбов на стадии С, определенный с помощью диаграммы О-С. Данное предположение вполне обосновано. На стадии С сверхгорбы имели стабильный период очень близкий по величине к периоду сверхгорбов в начале стадии В, когда, как считается, происходит зарождение прецессии на радиусе резонанса 3:1. Решая уравнения (7) и (8), можно найти q как функцию η , и затем, подставляя q в уравнение (3), найти радиус диска r , опять же, как функцию η . Проблема состоит в том, что отношение масс компонентов q сильно зависит от η и равняется 0.033 для $\eta=1$, 0.044 для $\eta=0.75$ и 0.068 для $\eta=0.5$. Радиусы резонансов и радиус приливного воздействия также зависят от q и, соответственно, от η . Однако из-за используемого метода калибровки, влияние изменений η на рассчитанные радиусы практически свелось к нулю. Мы рассчитали радиусы дисков для различных η , соответствующих характерным для звезд типа WZ Sge значениям q и сравнили полученный результат с наблюдаемыми кривыми блеска.

3. Обсуждения. Зависимость радиуса диска на стадиях В и С, рассчитанного для различных значений η от времени, представлена на рис.2. Мы использовали следующие значения η : 1, 0.75 и 0.05. Радиус диска, радиусы резонансов 3:1 и 2:1, а также радиус приливного воздействия, полученные для данных η , представлены на графике черными кружками и сплошной линией, полыми кружками и пунктирной линией, крестами и штрихпунктирной линией, соответственно. Стадии В и С также отмечены на этом графике. Из рис.2 можно видеть, что из-за процедуры калибровки изменение величины η практически не влияет на ход зависимости радиуса аккреционного диска от времени. Все кривые лежат очень близко друг к другу. Радиусы резонансов слабо зависят от q и, поэтому, также практически не изменяются при вариациях данного коэффициента пропорциональности. Заметные, но несущественные расхождения наблюдаются лишь в расчи-

танных величинах радиуса приливного воздействия. Таким образом, мы можем проследить изменения радиуса аккреционного диска со временем, даже при неизвестных q и η . Тем не менее, данный подход не позволяет найти величину η , важную для дальнейших подобных исследований.

Чтобы определить η , мы использовали следующее уравнение. Като [10] уточнил зависимость между отношением масс компонентов и относительного дефицита периода $\varepsilon = (P_{orb} - P_{sh})/P_{orb}$ и получил выражение:

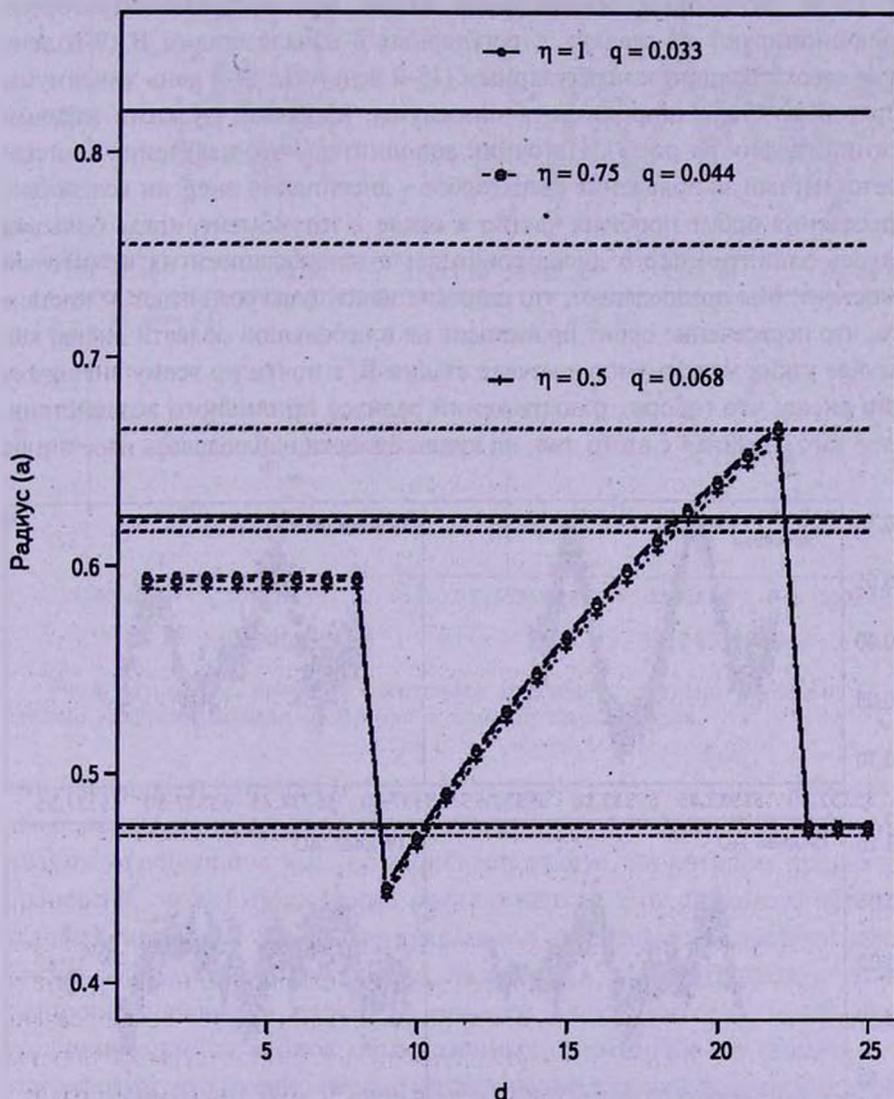


Рис.2. Оценки радиуса аккреционного диска OT J2138 для различных значений параметра η . Радиусы резонансов 3:1 и 2:1, а также радиус приливного воздействия, полученные для $\eta=1$, представлены на графике черными кружками и сплошной линией, для $\eta=0.75$ — полными кружками и пунктирной линией, для $\eta=0.5$ крестами и штрихпунктирной линией, соответственно. Стадии сверхгорбов В и С также отмечены.

$$\varepsilon = 0.16(2)q + 0.25(7)q^2, \quad (9)$$

Учитывая наши значения P_{orb} и $P_{\text{ш}}$, отношение масс получилось равным $q = 0.057$. Подставляя найденное таким образом q в (7) и (8), получим значение η порядка 0.6.

3.1. *Сравнение с изменениями профилей сверхгорбов.* Рис.3 и рис.4 иллюстрируют изменения профилей сверхгорбов карликовой новой OT J2138. Во-первых, из графиков видно, что профили сверхгорбов эволюционируют от гладких и регулярных в начале стадии В (9-й день после сверхвспышки) к нерегулярным (15-й день). На 19-й день максимумы сверхгорбов стали широкими, а минимумы, наоборот - узкими (правый нижний график на рис.3). Источник дополнительного излучения в диске, ответственный за появление сверхгорбов - диссипация энергии вследствие пересечения орбит пробных частиц в диске в тот момент, когда большая полуось эллиптического диска совпадает с направлением на вторичный компонент. Мы предполагаем, что широкие максимумы возникают вследствие того, что пересечение орбит происходит не в небольшой области диска, как в случае узких максимумов в начале стадии В, а почти по всему внешнему краю диска, что говорит о достижении радиуса приливного воздействия. Более того, начиная с этого дня, на кривых блеска наблюдалась изрезанная

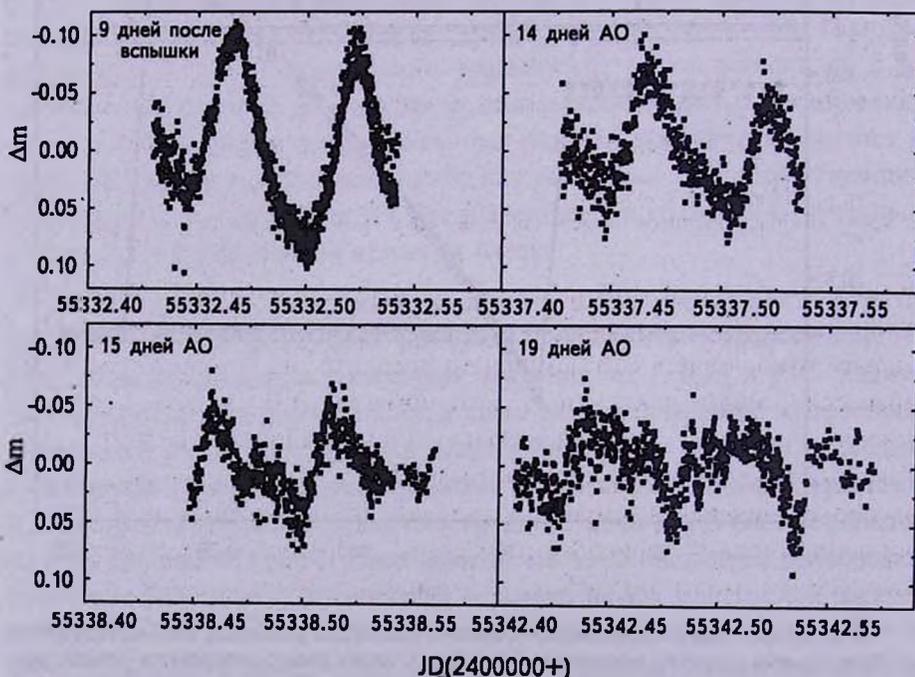


Рис.3. Изменение профилей сверхгорбов с течением времени на стадии В. Для каждого графика подписан номер дня с момента сверхвспышки.

форма профилей сверхгорбов с многочисленными пиками. Очевидно эксцентрическая часть диска начала терять устойчивость в силу значительно возросшего приливного воздействия вторичного компонента.

3.2. *Изменения радиуса диска.* По нашим предположениям радиус аккреционного диска в течение сверхвыспышки изменяется следующим образом. Обыкновенные сверхгорбы, наблюдающиеся в начале стадии В,

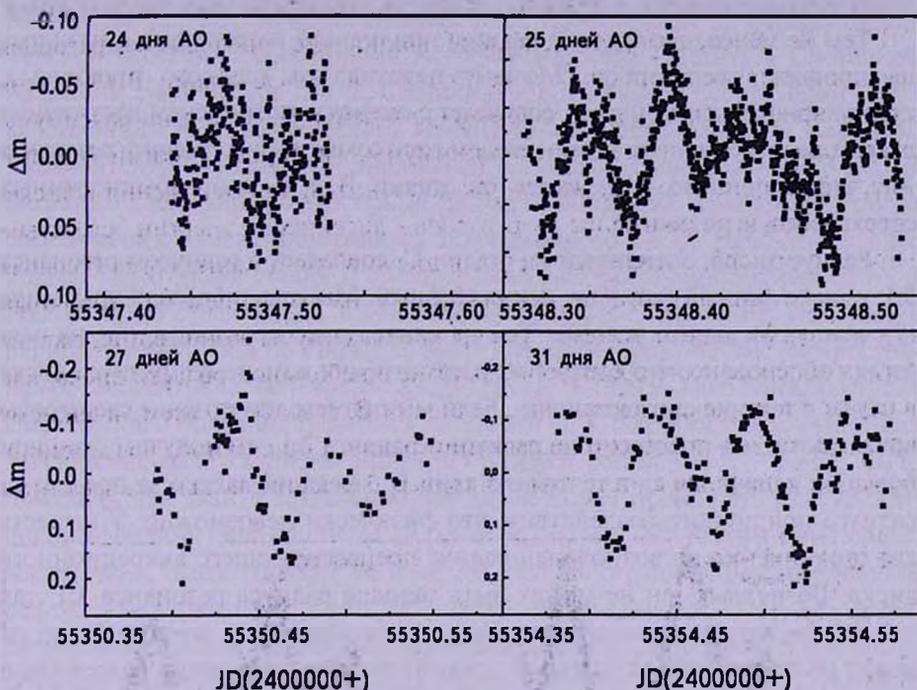


Рис.4. Изменение профилей сверхгорбов с течением времени на стадии С. Для каждого графика подписан номер дня с момента сверхвыспышки.

возникают из-за развития прецессии на радиусе резонанса 3:1. Моделирование также показывает [19], что в карликовых новых типа SU UMa с низким отношением масс компонентов радиус, на котором происходит прецессия, может постепенно увеличиваться. Это связано с обменом угловых моментов между центральными и внешними частями диска. Таким образом, формируется так называемая "эксцентрическая" волна, распространяющаяся вдоль по радиусу диска, которая и объясняет увеличивающийся период обыкновенных сверхгорбов на стадии В. Из этого следует, что именно первые установившиеся обыкновенные сверхгорбы отражают прецессию на радиусе резонанса 3:1, а последующие колебания, вплоть до стадии поздних сверхгорбов, - являются следствием прецессии на больших радиусах. По нашим оценкам радиус диска действительно увеличивался в течение стадии В, достигнув радиуса приливного воздействия

($r \approx 0.56a$) на 15-16-й день после сверхвспышки, и на 19-й день после сверхвспышки оказался больше радиуса резонанса 2:1 ($r \approx 0.62a$). Радиус приливного воздействия определяет внешний радиус диска в равновесном состоянии, однако аккреционный диск карликовой новой во время сверхвспышки далек от равновесия и может простираться за данный радиус, если в нем накоплено достаточное количество вещества. Более того, приливное воздействие вторичного компонента в двойной системе ослабевает по мере уменьшения q .

Тем не менее, достижение радиуса приливного воздействия отразилось на профиле сверхгорбов. Момент перехода от гладкого профиля к нерегулярному, изрезанному, совпадает с оценочным временем достижения диском данного радиуса. В дальнейшем диск сократился до радиуса резонанса 3:1, что и привело к переходу от стадии В к С и от обыкновенных сверхгорбов к поздним.

Радиус диска, оцененный на стадии С, совпадает с радиусом резонанса 3:1, однако данный результат искусственный. Мы откалибровали уравнение (9), используя данное условие. Тем не менее, такое предположение на наш взгляд обосновано, что следует из рассмотрения изменения радиуса диска в целом в течение сверхвспышки. Если мы примем, что поздние сверхгорбы возникают из-за прецессии на радиусе резонанса 2:1, мы получим слишком большой радиус диска в течение стадии В, лежащий далеко за пределами радиуса приливного воздействия, что физически невозможно. У нас есть два ограничения на возможный радиус прецессирующего аккреционного диска. Во-первых, он не может быть меньше радиуса резонанса 3:1, так как в этом случае никакой прецессии не возникнет, и, во-вторых, он не может распространяться далеко за пределы радиуса приливного воздействия, так как такой диск со временем потеряет устойчивость. Из рис.2 видно, что радиусы, рассчитанные для OT J2138, удовлетворяют этим условиям.

Для некоторых звезд типа WZ Sge подобные расчеты показали, что сверхгорбы на стадии С возникают из-за прецессии диска на радиусе близком к радиусу резонанса 2:1. Для объектов GW Lib, V455 And и WZ Sge поздние сверхгорбы имели период близкий к тому, что наблюдался в конце стадии В, и резкого скачка периода при переходе от обыкновенных сверхгорбов к поздним не произошло [9]. Такая же ситуация наблюдалась в V1108 Her [21]. Вероятно, существуют два подкласса звезд типа WZ Sge. В экстремальном подклассе (GW Lib, V455 And, WZ Sge, V1108 Her):

- нет выделенной стадии С,
- поздние сверхгорбы имеют период близкий к наблюдавшемуся в конце стадии В (максимальный период).

В классическом случае:

- есть выраженная стадия С,
- сверхгорбы на этой стадии имеют период близкий к наблюдавшемуся

в начале стадии В (минимальный период).

ОТ J2138, очевидно, является "классической" карликовой новой типа WZ Sge, с выделенной стадией С и поздними сверхгорбами, возникающими из-за прецессии на радиусе резонанса 3:1.

4. *Заключение.* Мы приводим оценки изменений радиуса аккреционного диска карликовой новой ОТ J2138 во время ее сверхвысшишки, основанные на фотометрических наблюдениях, проведенных на обсерваториях Терскол (Россия), обсерватории Астрономического Института Словацкой Академии Наук (Стара Лесна, Словакия) и в Крымской лаборатории Государственного Астрономического Института им. Штернберга (п. Научный, Украина). Мы использовали динамическую модель прецессирующего аккреционного диска карликовых новых, связав наблюдаемое изменение периода сверхгорбов с изменением радиуса аккреционного диска. Наблюдались две стадии сверхгорбов: стадия В с непрерывно увеличивающимся периодом, и стадия С, со стабильным, относительно коротким периодом. Изменения периода сверхгорбов на стадии В были интерпретированы как распространение эксцентрической волны вдоль диска, а переход от обыкновенных сверхгорбов с большим периодом на стадии В, к поздним сверхгорбам как сокращение радиуса диска вплоть до радиуса резонанса 3:1. Также было показано, что радиус аккреционного диска может превышать радиус приливного воздействия, достигая радиуса резонанса 2:1. Радиус приливного воздействия, таким образом, не является строгим ограничением на внешний радиус аккреционного диска во время сверхвысшишки. Тем не менее, превышение диском приливного барьера отражается на профиле сверхгорбов, который меняется с гладкого на изрезанный и нерегулярный. ОТ J2138 была отнесена к "классическим" карликовым новым типа WZ Sge с выраженной стадией С сверхгорбов, имеющих период, близкий по величине к периоду в начале стадии В и возникающих из-за прецессии на радиусе резонанса 3:1.

Данная работа была проведена при поддержке программы двустороннего международного обмена 2012 ведущих мировых научных центров (Global Center Of Excellence Bilateral International Exchange Program 2012), представленной университетом Киото и Министерством образования, Культуры, Спортa, Науки и Технологий Японии. Мы также хотели бы выразить признательность доктору Йожи Осаки за ценные комментарии и С.Ю.Шугарову, Н.А.Катьшевой и М.В.Андрееву за предоставленный наблюдательный материал.

¹ Государственный Астрономический Институт им. Штернберга, Россия

² Физический факультет Московского Государственного Университета им. М.В.Ломоносова, Россия, e-mail: polina.zemko@gmail.com

³ Астрономическое отделение Университета Киото, 606-8502
e-mail: tkato@kusastro.kyoto-u.ac.jp

ESTIMATES OF THE ACCRETION DISC RADIUS IN DWARF NOVA PEGASI 2010

P.ZEMKO^{1,2,3}, T.KATO³

We present estimation of the radius of accretion disc based on the photometrical observations of the dwarf nova OT J213806.6+261957 in Pegasus, a WZ Sge-type star, discovered during its superoutburst on May 6, 2010. As the other members of WZ Sge type stars, DN in Pegasus showed superhumps that appeared shortly after the beginning of the superoutburst. Photometric observations, obtained between May 15 and December 2, 2010, allowed us to find the superhumps period change and thus follow the evolution of the accretion disc radius during the superoutburst in the framework of the tidal instability model of DNe superoutbursts. It is shown that the disk radius can exceed the radius of 3:1 resonance and expand above the tidal limit.

Key words: stars: photometry: double systems: dwarf nova

ЛИТЕРАТУРА

1. B.Warner, "Cataclysmic Variable Stars", Cambridge, 1995.
2. C.Heller, "How and why they vary", Springer, 2000.
3. R.Whitehurst, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 232, 35, 1988.
4. M.Hirose, Y.Osaki, PASJ, 42, 135, 1990.
5. S.H.Lubow, Astrophys. J., 381, 259, 1991.
6. S.H.Lubow, Astrophys. J., 381, 268, 1991.
7. T.Kato, D.Nogami et al., PASJ, 54, L11, 2002.
8. N.Vogt, Astrophys. J., 252, 653, 1982.
9. T.Kato, H.Maehara, B.Monard, PASJ, 60, L23, 2008.
10. T.Kato, A.Imada, M.Uemura et al., PASJ, 61, S395, 2009.
11. T.Kato, H.Maehara, M.Uemura et al., PASJ, 62, 1525, 2010.
12. T.Kato, H.Maehara, I.Miller et al., PASJ, 64, 21K, 2012.
13. T.Kato, F.-J.Hambsch, H.Maehara et al., arXiv:1210.0678, 2012.
14. S.H.Lubow, Astrophys. J., 401, 317, 1992.
15. K.Uemura et al., Astron. Astrophys., 432, 261, 2005.
16. A.J.Smith, C.A.Haswell, J.R.Murray et al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 378, 3, 785, 2007.
17. D.Chochol, N.A.Katysheva, S.Yu.Shugarov et al., CAOSP, 42, 39, 2010.
18. J.R.Murray, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 315, 707, 2000.
19. М.Ф.Субботин, "Введение в теоретическую астрономию", М., Наука, Глав. Ред. физ-мат лит., 1968.
20. J.R.Murray, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 314, L1, 2000.
21. E.P.Pavlenko, T.Kato, O.I.Antonyuk et al., Astrophysics, 54, 483, 2011.