

НЕОБЫЧНЫЕ ПОВТОРЯЮЩИЕСЯ ЗАТМЕНИЯ ЗВЕЗДЫ ТИПА UX Ori WW Vul

А.Н.РОСТОПЧИНА-ШАХОВСКАЯ¹, В.П.ГРИНИН^{2,3},
Д.Н.ШАХОВСКОЙ¹

Поступила 12 января 2012

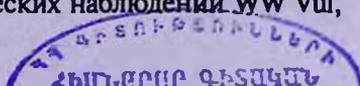
Изучая фотометрическую активность WW Vul на продолжительном интервале времени (около 30-ти лет), мы обнаружили на кривой блеска звезды необычные затмения. Они продолжаются 2-3 года и повторяются с периодом 13.9 лет. Нетривиальная особенность затмений состоит в том, что в их самой глубокой части блеск звезды увеличивается. Изменения показателей цвета во время этих событий свидетельствуют о том, что поярчание звезды вызвано уменьшением экстинкции в центре протяженной газопылевой структуры, периодически пересекающей луч зрения. Кратко обсуждаются возможные механизмы таких затмений.

Ключевые слова: *звезды:затмения - объект:WW Vul*

1. *Введение.* Звезда WW Vul ($Sp = A3e IV$) принадлежит семейству неправильных переменных типа UX Ori, особенностью фотометрического поведения которых являются спорадические ослабления блеска с амплитудой до 2-3 звездных величин и продолжительностью от нескольких до нескольких десятков дней. Ослабления блеска сопровождаются ростом линейной поляризации, свидетельствующим о затменной природе минимумов [1]. Кривые блеска во время затмений имеют сложную форму, обусловленную изменениями экстинкции в околос звездном диске. Такая интерпретация подразумевает, что газопылевой диск, являющийся источником поляризованного рассеянного излучения, не сильно наклонен относительно направления на наблюдателя. Свидетельством в пользу того, что это действительно так, является высокая линейная поляризация, наблюдаемая в глубоких минимумах этих звезд [1].

Кроме спорадических затмений у ряда звезд типа UX Ori наблюдаются циклические вариации блеска продолжительностью от нескольких месяцев до десяти и более лет (см. например, [2-4]). Происхождение таких циклов связывают с изменениями околос звездной экстинкции, вызванными орбитальным движением компаньонов [5-7]. В данной статье речь пойдет именно о таких событиях, выявленных нами при анализе фотоэлектрических наблюдений WW Vul.

2. *Необычное затмение 1994-1997гг.* Анализируя результаты синхронных фотометрических и поляриметрических наблюдений WW Vul,



выполненных нашей группой в девяностых годах [8], мы обратили внимание на необычную форму обширного затмения, наблюдавшегося у этой звезды в течение примерно трех лет с 1994 по 1997гг. (рис.1, 2). Амплитуда затмения в полосе V была около $1^m.5$. Оно имело довольно симметричную форму. Медленный спуск вниз продолжался около года. Подъем был немного более коротким. При этом часть его пришлось на

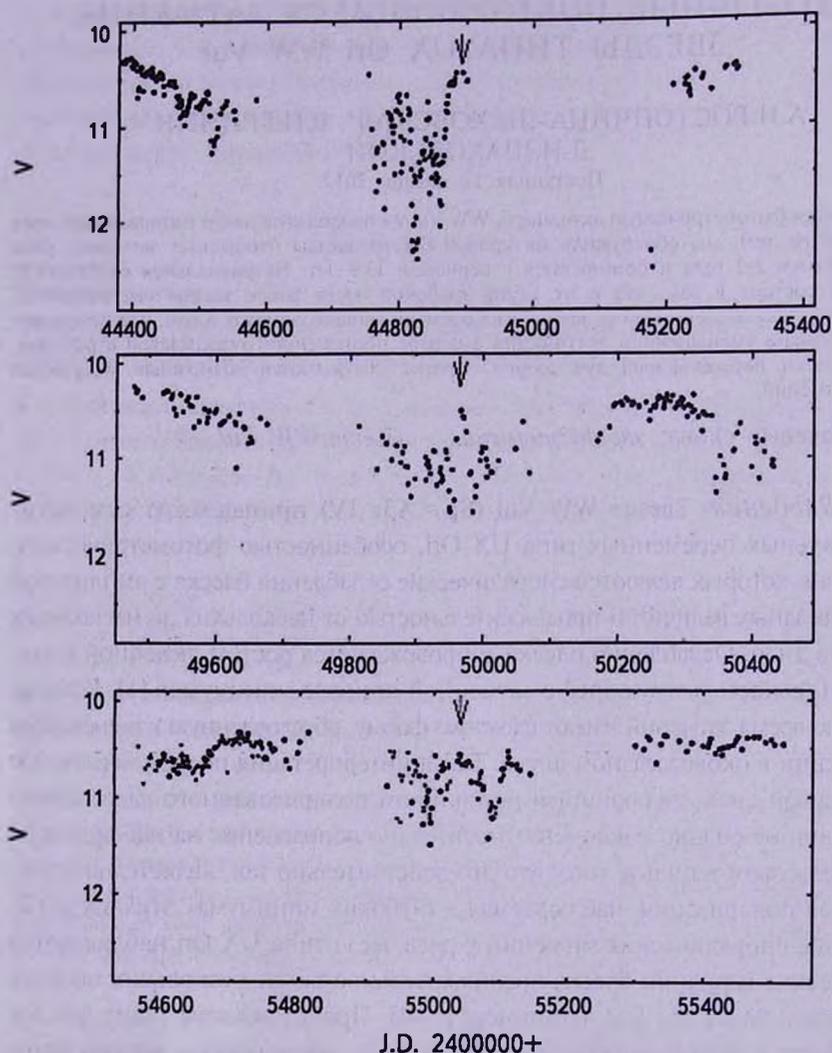


Рис.1. Три фрагмента кривой блеска WW Vul в полосе V : сверху - затмение 1981-1982гг. по данным Кардолова и Филиппьева [13], Зайцевой [14] и Пугача [17]; в центре - затмение 1994-1997гг. по данным Ростопчиной и др. [8], дополненным наблюдениями из базы данных КрАО; внизу затмение 2008-2010 гг. - по данным наших наблюдений (+) и данным ASAS [18] (·). Стрелками обозначены моменты наибольшей яркости звезды в центральной части каждого затмения. Интервал времени между этими событиями равен 5070 ± 10 дней.

межсезонный перерыв в наблюдениях. В самой глубокой части затмения блеск звезды внезапно увеличился примерно на 1^m , и в таком состоянии звезда находилась около месяца.

Линейная поляризация WW Vul во время затмения, а также до и после него, вела себя довольно необычно по сравнению с нашими предыдущими наблюдениями [8-11] (начаты в 1986г.): при небольших по амплитуде изменениях блеска и близкой к нулю степени поляризации наблюдались кратковременные и весьма значительные по амплитуде изменения ее позиционного угла (рис.2). Такой тип переменности параметров поляризации можно наблюдать у объекта, состоящего из двух источников поляризованного излучения, примерно равных по интенсивности, но сильно отличающихся по позиционному углу поляризации. В этом случае небольшие флуктуации яркости одного из источников могут сопровождаться сильными вариациями позиционного угла суммарного излучения при почти неизменном общем блеске системы.

Другое объяснение, которое мы считаем наиболее вероятным, состоит в том, что собственная (переменная) поляризация звезды, обусловленная рассеянием излучения звезды околосредной пылью, оказалась в рассматриваемом временном интервале почти ортогональной межзвездной поляризации. Конкуренция этих двух механизмов поляризации и является причиной наблюдаемых всплесков позиционного угла поляризации.

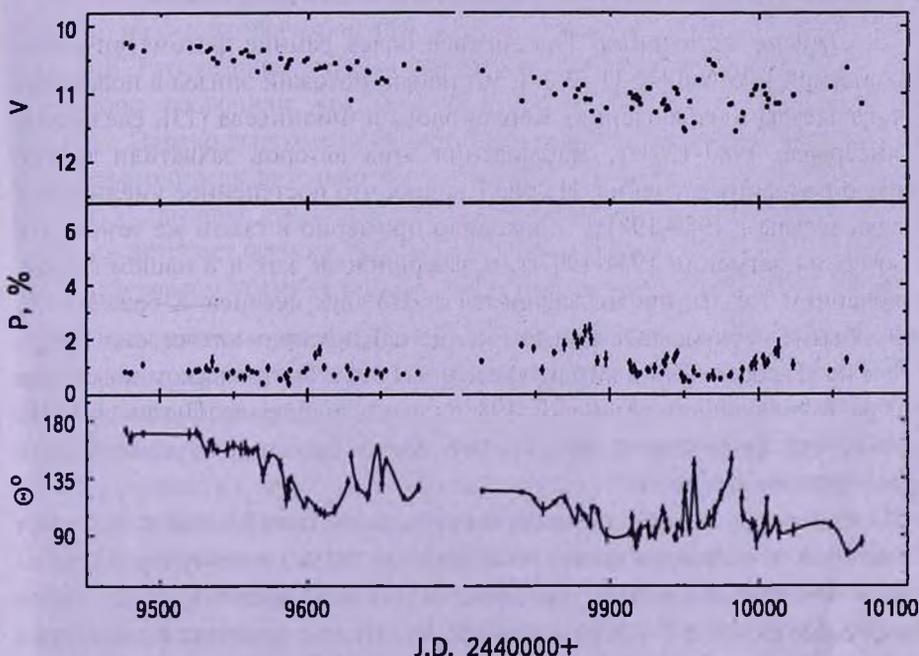


Рис.2. Поведение линейной поляризации WW Vul в ходе продолжительного затмения 1994-1997гг. по данным [8].

Действительно, согласно нашим ранним наблюдениям [9], позиционный угол собственной поляризации в ярком состоянии WW Vul был близок к 165° и практически совпадал с позиционным углом межзвездной поляризации, полученным по наблюдениям окрестных звезд. Поэтому в моменты алголеподобных минимумов степень наблюдаемой поляризации звезды увеличивалась при почти неизменном позиционном угле поляризации. Однако к середине 90-х годов позиционный угол собственной поляризации в ярком состоянии звезды изменился почти на 90 градусов. В результате собственная и межзвездная компоненты поляризации оказались почти ортогональными друг другу. Так возникла описанная выше ситуация, при которой небольшие изменения блеска и собственной поляризации звезды сопровождаются сильными вариациями позиционного угла ее поляризации.

Таким образом, переменность параметров собственной поляризации WW Vul на большой временной шкале указывает на то, что структура околос звездного пылевого окружения этой звезды отличается от тех простых аксиально-симметричных моделей, которые применялись для объяснения фотополариметрической активности звезд типа UX Ori (см. [12] и цитированную там литературу). Эта структура сильно переменна, что свидетельствует о сильных возмущениях во внутренней области околос звездного диска, способных изменять геометрию рассеивающей среды. Причиной таких возмущений может быть присутствие компаньона (протопланеты) в ближайшей окрестности звезды (см. ниже).

3. *Другие затмения.* Просмотрев более ранние фотометрические наблюдения WW Vul [10,11,13-17], мы нашли похожий эпизод в поведении блеска звезды в наблюдениях Кардополова и Филипьева [13], сделанных в интервале 1980-1981гг. Наблюдения этих авторов захватили только первую половину затмения. Из рис.1 видно, что постепенное уменьшение блеска звезды в 1980-1981гг. проходило примерно в таком же темпе, что и во время затмения 1994-1997гг. и завершилось, как и в нашем случае, поярчением звезды, продолжавшимся около двух месяцев. К сожалению, это событие наблюдалось в самом конце наблюдательного сезона 1981г., и нам не удалось найти в литературе данных о фотометрическом поведении звезды в следующем сезоне. В 1983г. звезду наблюдал Пугач [17]. По данным его фотометрии звезда в это время была преимущественно в ярком состоянии (рис.1).

Предполагая, что оба затмения были вызваны одной и той же пылевой структурой, и используя моменты поярчения звезды в центральной части затмения в качестве репера, мы оценили интервал времени между этими двумя событиями: $\Delta T \approx 5050 \pm 20$ дней. Если такие затмения повторяются с этим периодом, то следующее затмение должно было состояться в 2008-2010гг. с центром вблизи $JD = 2455000$. Анализ фотоэлектрических

Юлюдер. * WW Vul, полученных нами в КрАО, а также данных из фотометрического архива телескопа-робота ASAS [18], показал, что ожидаемое затмение звезды действительно началось в 2008г., и его центральная часть довольно точно совпала с предсказанной датой. Из рис.1 видно, что в этом интервале времени вновь наблюдалось увеличение блеска звезды. Оно продолжалось около трех месяцев, т.е., несколько дольше, чем в затмении 1994-1997гг., и имело несколько меньшую амплитуду (как и само затмение), и если бы мы не знали заранее время, когда оно должно было произойти, мы могли бы его не заметить на фоне спорадической переменности блеска WW Vul. Это событие позволило нам уточнить интервал времени между последовательными затмениями: $\Delta T \approx 5070 \pm 10$ дней (или 13.9 лет).

Благодаря тому, что кроме наших наблюдений WW Vul при построении кривой блеска звезды в 2008-2010гг. были использованы также данные телескопа-робота ASAS [18], суммарный ряд наблюдений оказался довольно плотным. Из рис.1 видно, что центральное поярчение во время затмения 2008-2010гг. имело такую же симметричную форму, как и в предыдущем затмении. И точно также минимальный блеск звезды наблюдался непосредственно перед поярчением и сразу после его окончания. Эти повторяющиеся детали говорят о том, что затмения были вызваны одним и тем же механизмом.

Более ранняя фотометрическая история WW Vul, основанная, главным образом, на фотографических наблюдениях, анализировалась Фридеманном и др. [19]. Рассматривая данные фотометрии, полученные с 1898 по 1992гг., эти авторы заключили, что изменения блеска WW Vul носят случайный характер. Однако выполненный ими Фурье-анализ фотометрического ряда, из которого предварительно были удалены глубокие ослабления блеска ($V \geq 11.3$), выявил два слабых пика в спектре мощности. Один из этих пиков соответствует периоду 5059 дней, т.е., практически совпадает с найденным нами интервалом времени между последовательными затмениями звезды.

4. *Возможные механизмы повторяющихся затмений.* Таким образом, есть основания предполагать, что необычные затмения WW Vul повторяются примерно каждые 14 лет и вызваны периодическими изменениями околозвездной экстинкции. Такие изменения экстинкции могут возникнуть в результате периодического увеличения геометрической толщины газопылевого диска в зоне сублимации пыли, поскольку при небольшом наклоне диска к лучу зрения эта область является наиболее вероятным источником околозвездной экстинкции [20]. Периодическое увеличение толщины диска можно объяснить периодическими усилениями темпа аккреции газа на звезду, предположив, что WW Vul имеет компаньона, движущегося по эксцентрической орбите. Согласно газодинамическим

расчетам Артимоновича и Любова [21] в таких системах возможна сильная модуляция темпа аккреции на компоненты системы с фазой орбитального периода. Такая модель позволяет объяснить, по крайней мере качественно, периодические усиления околозвездной экстинкции, но оставляет открытым вопрос о причине внезапных поярчений в глубокой части затмений.

Их можно было бы отождествить со вспышками, обусловленными увеличением темпа аккреции. Но это, похоже, не вспышки. Анализ изменений показателей цвета звезды во время поярчений показывает, что они вызваны кратковременным (по сравнению с продолжительностью затмения) *уменьшением экстинкции*. На рис.3 в качестве примера показана диаграмма $(B - I)/V$, построенная по данным наших наблюдений для затмения 1994-1996гг. Видно, что во время поярчения точки на диаграмме сместились в том же направлении, что и во время затмения. Такой же

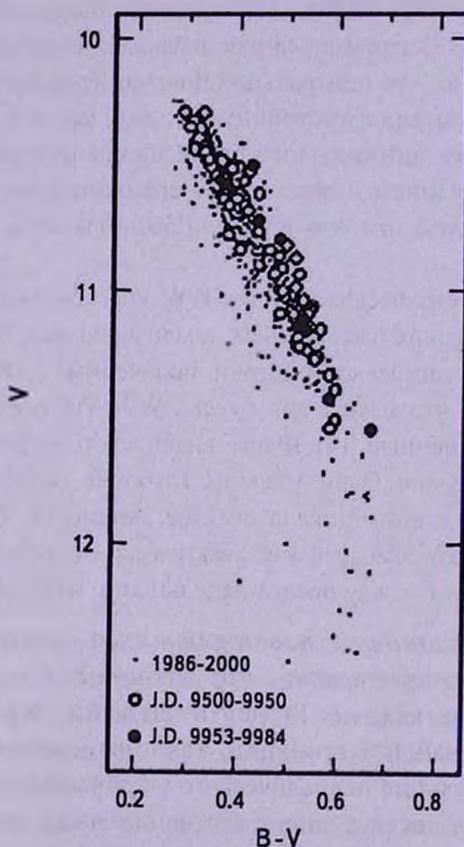


Рис.3. Диаграмма цвет-величина $V/(B - I)$ WW Vul по данным наших наблюдений: точки - наблюдения с 1986 по 2000гг.; открытые кружки - наблюдения на нисходящей части затмения 1996-1998гг., заполненные кружки соответствуют центральному поярчению. Видно, что закон покраснения на нисходящей части затмения и во время поярчения одинаков и согласуется с общей картиной колориметрических изменений, наблюдавшихся у звезды на более широком интервале времени 1986-2000гг.

вывод следует из анализа изменений других показателей цвета WW Vul. Поэтому, если принять, что затмения вызваны периодическим экранированием звезды движущейся вокруг нее протяженной пылевой структурой, то необходимо предположить, что в центре этой структуры существует полость, свободная от пыли (или менее заполненная пылью).

Из наблюдений следует, что пылевая структура и ее центральная полость подвержены изменениям. На рис.1 виден отчетливый тренд при переходе от одного затмения к другому, заключающийся в систематическом уменьшении со временем как глубины затмения, так и амплитуды поярчания звезды в центре затмения. В последнем затмении поярчание звезды продолжалось примерно вдвое больше, чем в предыдущем.

Существует несколько механизмов затмений молодых звезд, в которых формы кривых блеска обладают похожими свойствами.

5. Затмения дисковым ветром вторичного компонента.

Расчеты показывают [22], что продолжительные затмения могут быть вызваны поглощением пылью в магнито-центробежном дисковом ветре вторичного компонента, пересекающем луч зрения. Ветер стартует с поверхности аккреционного диска, состоящего из газа и пыли. В процессе ускорения ионы и электроны увлекают за собой нейтральные атомы и мелкие пылинки [23]. Благодаря этому мелкая пыль (которая и обеспечивает основной вклад в непрозрачность околосредного вещества) присутствует в ветре примерно в той же пропорции по отношению к газу, что и в самом диске. При этом, благодаря высокой эффективности охлаждения пылевых частиц излучением, пылинки выживают в газовой среде с температурой атомов существенно превышающей температуру сублимации пыли [22].

Данная модель хорошо подходит для объяснения наблюдаемой формы затмений, поскольку дисковый ветер имеет угол раствора, зависящий от параметров магнитного поля в диске [24]. Внутри этого конуса вещество отсутствует (на большом удалении от диска возможна коллимация дискового ветра и образование джета). Поэтому оптическая толщина по пыли минимальна при пересечении луча зрения центральной областью дискового ветра. Основная трудность с применением этой модели состоит в том, что для создания затмений, продолжительностью около $1/5$ орбитального периода, необходимо, чтобы дисковый ветер был непрозрачен по пыли на больших расстояниях от источника ветра. Для этого, как показывают оценки, необходимо, чтобы темп истечения был порядка $10^{-7} M_{\odot}$ в год, что, по-видимому, значительно превышает возможности гипотетического компаньона.

6. Затмения газопылевым диском.

Похожие по форме затмения наблюдаются у хорошо известной затменной системы ϵ Aul и объясняются прохождением по лучу зрения протяженного газопылевого диска, окружающего невидимый компонент системы [25-27]. Предполагается, что

диск слегка наклонен относительно плоскости орбиты, и в его центральной части имеется полость, свободная от пыли (или менее заполненная пылью). При прохождении этой полости по диску звезды в центре затмений наблюдается небольшое по амплитуде поярчание звезды. Затмения ϵ Aur продолжаются около 2 лет и повторяются с периодом около 27 лет (в начале 2011г. завершилось очередное затмение звезды).

Причина, по которой в центре пылевого диска, окружающего невидимый компаньон ϵ Aur, существует полость свободная от вещества, до сих пор не ясна. Возможно, ее образование вызвано тем, что невидимый компаньон сам является двойной системой (в этом случае полость в центре диска образуется вследствие периодических возмущений, порождаемых орбитальным движением компонентов [28]). В случае WW Vul такая возможность представляется довольно экзотичной, хотя и не может быть исключена полностью. Для объяснения наблюдаемых изменений формы и глубины затмений необходимо предположить, что параметры газопылевого диска вокруг компаньона заметным образом меняются от затмения к затмению. Чем может быть вызвана такая переменность, не ясно.

Если наблюдаемые затмения вызваны присутствием компаньона, то должны наблюдаться вариации лучевой скорости звезды с периодом около 14 лет. Например, если масса невидимого компаньона равна $0.25 M_{\odot}$, то при массе WW Vul, равной $2.2 M_{\odot}$ [29] амплитуда изменений ее лучевой скорости (в случае круговой орбиты) равна примерно 2 км/с. При скорости вращения звезды $v_{\text{ini}} = 220$ км/с [30] обнаружить такое изменение лучевой скорости чрезвычайно трудно. При расстоянии до WW Vul 550 пк [19] угловое расстояние, соответствующее радиусу орбиты гипотетического компаньона (≈ 7.5 а.е.), равно примерно 14 mas. Смещение положения звезды на небе, вызванное движением по орбите, также весьма мало: около 3 mas. Присутствие компаньона можно попытаться обнаружить методами интерферометрии в инфракрасной области спектра. Успешные попытки таких наблюдений с помощью VLTI хорошо известны (см., например, [31]).

7. *Торнадо в аккреционном диске WW Vul.* Затмения, похожие по форме на наблюдаемые у WW Vul, можно попытаться объяснить не привлекая гипотезу о компаньоне. Из работ по газодинамике аккреционных дисков известно (см., например, [32] и цитированные там статьи), что в дифференциально вращающихся дисках могут возникать вихревые структуры - циклоны и антициклоны. Антициклоны более устойчивы и могут совершить несколько десятков оборотов вокруг звезды прежде, чем распасться, а их размеры могут достигать 1/3 длины орбиты [33]. Предполагается, что они играют важную роль в образовании планетозималей и планет, поскольку захватывают частицы пыли из окружающей среды и способствуют их слипанию и образованию крупных тел [34,35]. Циклоны, напротив,

разбрасывают частицы пыли. Структура циклонических вихрей такова, что оптическая толщина по пыли минимальна, когда луч зрения пересекает его центральную область [34]. Поэтому, если образующиеся в диске вихри способны выбросить в атмосферу диска достаточное количество пыли, то, при прохождении по лучу зрения такие структуры могут вызвать затмения, по форме похожие на описанные выше.

Таким образом, существует несколько механизмов периодических или квазипериодических (модель с торнадо) затмений молодых звезд, в которых форма кривых блеска, по крайней мере, качественно похожа на описанные выше затмения WW Vul. Поиск похожих фотометрических событий в поведении блеска других звезд типа UX Ori, а также детальный анализ поляризационных наблюдений будут способствовать лучшему пониманию физики этих необычных явлений.

Авторы благодарны Л.В.Тамбовцевой и рецензенту - Е.Н.Копачкой - за полезные замечания. Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН "Нестационарные процессы в окрестностях звезд и галактик" и программы поддержки ведущих научных школ (НШ-1625.2012.2).

¹ Крымская астрофизическая обсерватория, Украина

² Главная (Пулковская) обсерватория РАН, Ст. Петербург, Россия, e-mail: vgrin@mail.ru

³ Астрономический институт им. В.В.Соболева, Ст.-Петербург, Россия

THE UNUSUAL RECURRENT ECLIPSES OF THE UX Ori TYPE STAR WW Vul

A.N.ROSTOPCHINA-SHAKHOVSKAJA¹, V.P.GRININ^{2,3},
D.N.SHAKHOVSKOI¹

Our study of the photometric activity of WW Vul during the long time (for about 30 years) revealed unusual eclipses on the light curve of this star. They last 2-3 years and repeated with the period of 13.9 years. A non-trivial feature of the eclipses is that in the deepest part of the light minima a star brightness increased. Changes in the color indices during these events implies that the star brightening is caused by an decrease in the extinction in the center of the extended gas and dust structure periodically intersecting the line of sight. Possible mechanisms of such eclipses are considered.

Key words: stars:eclipse - individual:WW Vul

ЛИТЕРАТУРА

1. *V.P.Grinin, N.N.Kiselev, N.Kh.Minikulov et al.*, *Astrophys. Sp. Sci.*, **186**, 283, 1991.
2. *W.Herbst, V.S.Shevchenko*, *Astron. J.*, **118**, 1043, 1999.
3. *А.Н.Ростопчина, В.П.Гринин, Д.Н.Шаховской, А.А.Ломач, Н.Х.Миникулов*, *Астрон. ж.*, **84**, 60, 2007.
4. *С.А.Артеменко, К.Н.Гранкин, П.П.Петров*, *Астрон. ж.*, **87**, 186, 2010.
5. *Н.Я.Сотникова, В.П.Гринин*, *Письма в Астрон. ж.*, **33**, 667, 2007.
6. *Т.В.Демидова, Н.Я.Сотникова, В.П.Гринин*, *Письма в Астрон. ж.*, **36**, 445, 2010.
7. *В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина, О.Ю.Барсунова, Т.В.Демидова*, *Астрофизика*, **57**, 407, 2010.
8. *A.N.Rostopchina, V.P.Grinin, D.N.Shakhovskoy, P.S.The*, *Astron. Astrophys. Trans.*, **15**, 159, 1998.
9. *В.П.Гринин, Н.Н.Киселев, Н.Х.Миникулов, Г.П.Чернова*, *Письма в Астрон. ж.*, **14**, 514, 1988.
10. *А.В.Бердюгин, В.П.Гринин, Н.Х.Миникулов*, *Известия КраО*, **86**, 69, 1992.
11. *Д.Н.Шаховской*, *Астрофизика*, **45**, 519, 2002.
12. *A.Natta, V.Whitney*, *Astron. Astrophys.*, **364**, 633, 2000.
13. *В.И.Кардополов, Г.К.Филиппев*, *Переменные звезды*, **22**, 122, 1985.
14. *Г.В.Зайцева*, *Переменные звезды*, **22**, 1, 1983.
15. *S.Rossiger, W.Wenzel*, *Astron. Nachr.*, **294**, 1, 1972.
16. *Г.В.Зайцева, В.М.Лютый*, *Письма в Астрон. ж.*, **23**, 277, 1997.
17. *А.Ф.Лузач*, *Переменные звезды*, **23**, 391, 1995.
18. *G.Pojmanski*, *Acta Astronomica*, **52**, 397, 2002.
19. *C.Friedemann, Y.-G.Reimann, J.Gurtler, V.Toth*, *Astron. Astrophys.*, **277**, 184, 1993.
20. *C.P.Dullemond, M.E. van den Ancker, B.Acke, R. van Boekel*, *Astrophys. J.*, **594**, L47, 2003.
21. *P.Artymowicz, S.H.Lubow*, *Astrophys. J.*, **467**, L77, 1996.
22. *В.П.Гринин, Л.В.Тамбовцева*, *Письма в Астрон. ж.*, **28**, 667, 2002.
23. *P.Safier*, *Astrophys. J.*, **408**, 115, 1993.
24. *R.D.Blandford, D.G.Payne*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **199**, 883, 1982.
25. *S.-S.Huang*, *Astrophys. J.*, **141**, 976, 1965.
26. *S.M.Caroll, E.F.Guinan, G.P.McCook, R.A.Donahue*, *Astrophys. J.*, **367**, 278, 1991.
27. *J.J.Lissauer, D.E.Backman*, *Astrophys. J.*, **286**, L39, 1984.
28. *P.Artymowicz, S.H.Lubow*, *Astrophys. J.*, **421**, 651, 1994.
29. *А.Н.Ростопчина*, *Астрон. ж.*, (ARep, **43**, 113), 1999.
30. *A.Mora, B.Merin, E.Solano et al.*, *Astron. Astrophys.*, **378**, 116, 2001.
31. *F.Millour, O.Chesneau, M.B.Fernandes et al.*, *Astron. Astrophys.*, **507**, 317, 2009.
32. *Н.Н.Клаhr, P.Bodenheimer*, *Astrophys. J.*, **582**, 869, 2003.
33. *P.Godon, M.Livio*, *Astrophys. J.*, **537**, 396, 2000.
34. *P.Barge, M.Viton*, *Astrophys. J.*, **593**, L117, 2003.
35. *P.Barge, J.Sommeria*, *Astron. Astrophys.*, **295**, L1, 1995.