

УДК 524.33.73

О ПРИЧИНАХ РАЗДЕЛЕНИЯ ВСПЫШЕК ЗВЕЗД ТИПА U БЛИЗНЕЦОВ НА ДВА ВИДА И МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВЕРХГОРБОВ

Л. Н. ИВАНОВ

Поступила 3 мая 1982

Принята к печати 27 января 1983

Предложено объяснение явления сверхгорбов на кривых блеска звезд типа SU Большой Медведицы. Одновременно вскрыты причины существования двух видов вспышек — длинных и коротких. В основу положены известные представления о релаксационном механизме этих вспышек, когда интенсивность свечения прямо связана с интенсивностью перетекания вещества от холодного компонента системы к горячему. Темп же обмена массой регулируется эффектом квазипериодического накопления и освобождения энергии в подфотосферных областях холодного компонента. Предположено, что накопленная энергия может высвечиваться не только равномерно по поверхности звезды, но и в форме отдельных горячих пятен. Чем меньше площадь пятна, тем дольше происходит высвечивание и тем дольше длится вспышка. Особенно длительны вспышки при образовании одного небольшого по площади пятна, что реализуется у звезд типа SU Большой Медведицы. Это же пятно наилучшим образом может проявиться в наблюдениях на кривой блеска благодаря вращению звезды. При множественном образовании пятен вспышка будет короткой, а вариации блеска от различных пятен взаимно компенсируются и становятся ненаблюдаемыми — у коротких вспышек сверхгорбов нет. Простыми следствиями этой модели являются: объяснение наблюдаемой переменности периода сверхгорбов, обнаружение на стадии биений по окончании большой вспышки звезды VV Гидры несинхронного вращения ее красного компонента в прямом направлении с периодом 2.85 суток.

1. Введение. Кривые блеска вспышек звезд типа U Близнецов обладают большим разнообразием, но наиболее загадочным всегда казалось наличие двух видов вспышек — больших и малых. В процессе больших вспышек выделяется в несколько раз больше энергии, чем при малых вспышках, в основном за счет большей их длительности. Размежевание этих явлений так сильно, что на гистограммах, показывающих частотность вспышек различных энергий, имеется глубокий минимум между отчетливыми максимумами, соответствующими большим и малым вспышкам [1].

Несколько лет назад были обнаружены, так называемые, сверхгорбы, появляющиеся у некоторых вспыхивающих звезд в процессе только боль-

ших вспышек [2, 3]. К настоящему времени явление сверхгорбов зарегистрировано у ряда звезд и имеется тенденция к выделению целого подтипа карликовых новых — звезд типа SU Большой Медведицы именно по этому признаку [4].

В настоящей статье явлению сверхгорбов будет уделено особое внимание, так как, по мнению автора, жесткая корреляция сверхгорбов с большими вспышками открывает новые возможности для углубления понимания природы вспышек карликовых новых вообще и причин разделения вспышек на два вида, в частности.

Одной из наиболее хорошо изученных звезд, показывающей сверхгорбы, является VW Гидры [5, 7]. Блеск этой системы благодаря сверхгорбам колеблется с амплитудой 0.2—0.3 звездных величин, при общем подъеме блеска из-за вспышки на 4^m — 5^m . Интервал повторения сверхгорбов при обнаружении вблизи максимума вспышки равен 110 минутам и по мере падения блеска приближается к величине орбитального периода 107 минут. Таким образом, отклонение периода сверхгорбов от орбитального у VW Гидры достигает 3%. Аналогичная величина у WX Гидры равна 4% [5] (см. рис. 1).

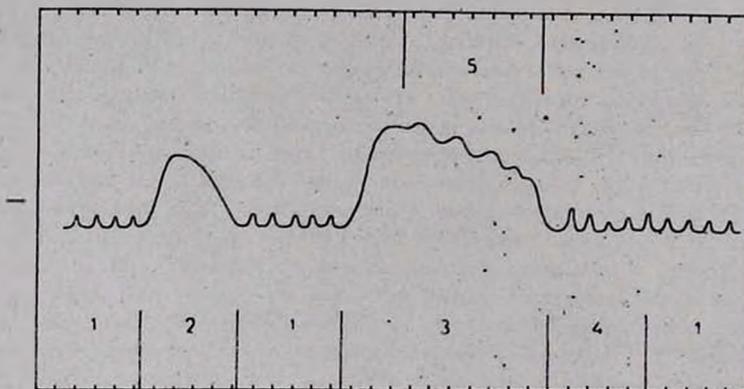


Рис. 1. Схематическое изображение кривой блеска звезды типа SU Большой Медведицы, 1 — орбитальные горбы; 2 — малая вспышка; 3 — большая вспышка; 4 — стадия бисней; 5 — сверхгорбы.

Чтобы подчеркнуть важное значение, которое придается этому загадочному явлению, остановимся вкратце на основных его объяснениях, опубликованных в литературе. В уже упомянутой работе [5] содержится критика гипотез, относящих источник излучения сверхгорбов к белому карлику или к его магнитосфере, поскольку характерные времена пульсаций белого карлика значительно короче, а ожидаемые времена прецессии значительно длиннее наблюдаемых периодов.

В статьях [4, 9] предлагается объяснение сверхгорбов взаимодействием горизонтальных колебаний на поверхности красного карлика с разными частотами, так называемых g -мод. При этом необходимо вводить предположение о чрезвычайно медленном, с периодом в несколько суток, вращении красного карлика относительно внешнего наблюдателя, то есть о сильнейшей несинхронности его вращения внутри системы.

Гипотеза яркого пятна на поверхности красного компонента впервые была высказана Уорнером [13] и развита в работе [5], где предполагается, что пятно возникает в результате удара о поверхность звезды газа, выброшенного из окрестности белого карлика под действием начавшейся вспышки. Это предположение не учитывает, что время жизни такого пятна не превышает нескольких времен механической релаксации фотосферных слоев, то есть нескольких часов [8].

В статье [10] предполагается, что во время вспышек возникает заметный эксцентриситет орбиты красного компонента. Тогда прецессионное движение линии апсид могло бы, по мнению авторов, объяснить отличия периода сверхгорбов от орбитального. В работе [11] утверждается даже, что это единственная жизнеспособная модель сверхгорбов в настоящее время.

В заключение этого обзора приходится отметить два слабых пункта всех упомянутых объяснений. Во-первых, они оставляют непонятным отсутствие сверхгорбов у малых вспышек. Во-вторых, игнорируют наблюдаемую переменность периодов сверхгорбов.

2. *Объяснение явления сверхгорбов.* Понять природу сверхгорбов возможно только в контексте объяснения более общего явления — самих вспышек звезд типа U Близнецов. К настоящему времени сформировалась та точка зрения, что вспышка порождается взаимодействием компонентов тесной двойной системы звезд [6]. Процесс захватывает оба компонента системы, но объяснение многих особенностей вспышек следует искать в функционировании механизмов накопления и переноса энергии в красном компоненте. Именно, его несинхронное вращение приводит к задержке в конвективной зоне энергии, произведенной стационарными внутренними источниками. Накопленная энергия квазипериодически освобождается, при этом разогреваются и увеличиваются в объеме околофотосферные слои. Увеличение размеров спутника приводит к увеличению перетекания вещества от спутника к главной звезде. В результате существенно увеличивается свечение дискообразной оболочки — это и есть наблюдаемая вспышка.

Основной тезис, развиваемый в настоящей статье, заключается в том, что характер вспышки, большая она или малая, определяется не различием в количестве накопленной энергии в недрах красного компонента, а

способом выхода этой энергии на поверхность звезды. Энергия может выходить не только равномерно по поверхности красного карлика, но и через ограниченные площадки, образуя отдельные горячие пятна. Процесс формирования таких пятен обсуждается далее, а сейчас важно отметить, что чем больше суммарная поверхность горячих областей, через которые высвечивается запасенная энергия, тем быстрее звезда придет в нормальное состояние, тем короче будет вспышка.

Очевидно, чем больше горячих областей и чем более разбросаны они по поверхности звезды, тем труднее наблюдать вариации блеска, возникающие при вращении этой звезды. Наилучшие условия для наблюдений реализовались бы для одиночного компактного пятна, которое, по нашему мнению, образуется при больших вспышках звезд типа SU Большой Медведицы.

Итак, явление сверхгорбов порождается горячим пятном, расположенным в экваториальной зоне вращающегося холодного компонента, но это не ударное пятно, как предполагается в работе [5], а область, через которую высвечивается накопленная в недрах спутника энергия.

Пользуясь наблюдениями вспышки звезды VW Гидры в системе *UBV* [2], нетрудно получить цвета излучения горячего пятна. Они группируются вокруг значений $U-B = -0^m.4$, $B-V = -0^m.1$ и соответствуют звезде главной последовательности спектрального класса B5 с эффективной температурой $T = 1.5 \cdot 10^4$ К. Отсюда следует, что 1 см^2 поверхности пятна излучает $\sim 3 \cdot 10^{12}$ эрг/с.

К сожалению, не известны ни расстояние до звезды VW Гидры, ни размер его компонентов, поэтому для оценки полной энергии, высветившейся через пятно, воспользуемся известными характерными значениями радиуса спутника у звезд типа U Близнецов, $R_0 = 2 \cdot 10^{10}$ см. Как это будет показано далее, пятно должно иметь размеры, сравнимые с радиусом звезды, значит, его площадь порядка 10^{20} см². При характерной длительности большой вспышки 10^6 с получаем оценку запасенной в спутнике энергии $Q \sim 3 \cdot 10^{38}$ эрг. Поскольку амплитуда сверхгорбов равна $\sim 0^m.2$, для полной энергии вспышки получаем величину $\sim 3 \cdot 10^{39}$ эрг, что находится в согласии с принятыми представлениями об энергетике вспышек звезд типа U Близнецов и может служить подтверждением реалистичности предлагаемой модели.

В работе [12] подчеркивалось, что для выяснения природы спутника нужно учитывать не его минимальную или максимальную светимость, а среднюю производительность его источников энергии. Используя полученную выше величину $Q \approx 3 \cdot 10^{38}$ эрг и учитывая интервалы между вспышками, для средней светимости холодного компонента получаем $L \sim 10^{32}$ эрг/с. В [12] отмечалось, что при такой светимости и размерах

звезда является субкарликом спектрального класса F и должна обладать конвективной оболочкой протяженностью $r_0 = 0.1 R_0$ или $2 \cdot 10^9$ см вдоль радиуса звезды.

Очевидно, что накопление энергии должно приводить к расширению слоев, соответствующих конвективной зоне. Для оценки этого эффекта учтем, что запасенная энергия $3 \cdot 10^{38}$ эрг распределена в объеме, занимаемом экваториальным поясом звезды, составляющем $3 \cdot 10^{30}$ см³, то есть в среднем плотность энергии возрастает на величину $\Delta Q = 10^8$ эрг/см³. Эта энергия идет частично на повышение температуры, частично на расширение объема, что приводит к падению плотности на величину $\Delta \rho$. Обозначив через ρ , T — невозмущенные значения плотности и температуры в звезде для $\Delta \rho$ имеем очевидное равенство

$$C_p T \Delta \rho = - \Delta Q, \quad (1)$$

где C_p — теплоемкость при постоянном давлении.

Для увеличения толщины газового слоя, первоначально образующего конвективную зону, имеем

$$\Delta r = - \int_{R_0 - r_0}^{R_0} \frac{\Delta \rho}{\rho} dr. \quad (2)$$

Так как в конвективной зоне сверхадиабатический градиент мал, для зависимости температуры от глубины можно использовать формулу

$$T(r) \approx \frac{g}{C_p} (R_0 - r) = \frac{g}{C_p} x, \quad (3)$$

где $g \approx 10^5$ см/с² — ускорение силы тяжести в подфотосферных слоях, x — расстояние от поверхности звезды, отсчитываемое в глубину. В [12] для описания строения холодного компонента предлагается выражение

$$\rho = K_1 T^{3/2}, \quad (4)$$

где K_1 порядка 10^{-12} .

На основании формул (2)–(4) получаем

$$\Delta r = \frac{\Delta Q}{g K_1} \left(\frac{C_p}{g} \right)^{3/2} \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{x^{5/2}}, \quad (5)$$

где $x_0 = 2 \cdot 10^9$ соответствует первоначальной глубине конвективной зоны, x_1 — уровень, до которого произошел прогрев за счет накопленной энергии.

Для различных стадий накопления энергии имеем следующие оценки увеличения толщины конвективной зоны:

x_1	10^9	10^8	10^7
Δr	10^5	10^7	$6 \cdot 10^8$

здесь x_1 и Δr выражены в сантиметрах.

Видно, что в то время, как фронт прогрева захватил половину конвективной зоны ($x_1 = 10^9$) и запасена уже большая часть необходимой энергии, радиус звезды увеличился очень незначительно. Но на последних стадиях перед вспышкой происходит стремительное расширение подфотосферных слоев. Окончательно слой расширяется примерно на 30% при заданной средней плотности добавочной энергии.

Исследуем вращение внешних слоев спутника по мере накопления энергии в недрах его конвективной зоны. Как будет показано далее, холодный компонент системы VW Гидры в промежутках между вспышками вращается с периодом $P_0 = 104$ минуты. При расширении конвективной зоны растет и радиус звезды. Из закона сохранения углового момента следует, что период вращения поверхностных слоев станет равным

$$P = P_0 \left(\frac{R_0 + \Delta r}{R_0} \right)^2 \approx P_0 \left(1 + 2 \frac{\Delta r}{R_0} \right). \quad (6)$$

Из полученных выше данных следует, что к началу вспышки радиус звезды увеличен на 3%, а период вращения поверхности звезды увеличен на 6%, что дает $P = 110$ минут.

Поскольку горячее пятно состоит из вещества, находящегося на уровне фотосферы, оно движется с этим же периодом. Как видно, наблюдаемый период сверхгорбов действительно должен отличаться от орбитального и это является простым следствием предложенной модели.

По мере высвечивания накопленной энергии подфотосферные слои сжимаются, поверхность звезды приближается к ее невозмущенному уровню. Вместе с этим и наблюдаемый период вращения звезды должен уменьшаться. Таким образом и переменность периода сверхгорбов находит свое объяснение.

По завершении большой вспышки вновь становится заметным орбитальный горб, причем его амплитуда и период испытывают периодические возмущения (см. рис. 1). Это явление получило название биений и в [5] интерпретируется как остаточное проявление сверхгорбов. По периоду биений, равному 2,85 суток и орбитальному в 107 минут в [5] вычислен период уже невидимых сверхгорбов, оказавшийся равным также 110 минутам.

В связи с этим отметим, что из данных работы [5] следует, что по прямым измерениям период сверхгорбов вначале медленно укорачивался, по мере падения блеска, а затем, при косвенном определении через период

биений, резко возрос. В контексте предлагаемой модели вспышки было бы сомнительным даже сохранение постоянного периода сверхгорбов, так как падение блеска вспышки свидетельствует об уменьшении перетекания вещества и об уменьшении радиуса красного карлика. Очевидно, что наблюдаемый период биений при заданном орбитальном может возникать при двух различных значениях периода сверхгорбов, не только в 110, но и в 104 минуты. Последнее число, по нашему мнению, гораздо лучше соответствует всей совокупности наблюдений, так как теперь существенное падение блеска вспышки сопровождается дальнейшим уменьшением периода вращения красного компонента. Блеск системы в это время еще примерно на $0^m.6$ выше минимального, то есть холодный компонент еще возбужден. В спокойном состоянии период его вращения должен быть еще меньше.

Эта оценка дает уникальное наблюдательное подтверждение представлениям о несинхронности вращения красного компонента в период между вспышками.

3. *Формирование горячих пятен.* Поскольку накопление энергии в звезде осуществляется в области, обладающей аксиальной симметрией, то обычно предполагается, что и выход энергии на поверхность происходит симметрично. Наблюдения вспышек звезд типа SU Большой Медведицы показывают, что возможно образование отдельных горячих областей.

Для уяснения механизма формирования горячих пятен следует принять во внимание, что красный карлик подвержен приливным деформациям, которые ни в коем случае не являются аксиально-симметричными. Приливные выступы А и В на рис. 2 являются районами пониженной гра-

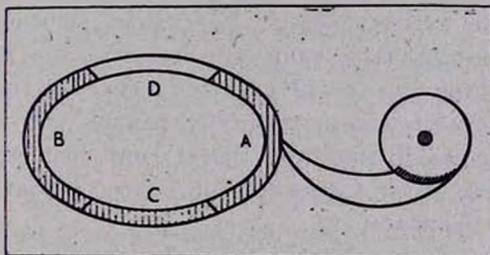


Рис. 2. Строение тесной двойной звезды типа U Близнецов. Слева холодный компонент. Штриховкой обозначена часть его конвективной зоны.

витаии. Повышенная же гравитация в окрестностях областей С и D должна при прочих равных условиях способствовать всплыванию горячей лучистой зоны сквозь сравнительно более холодную конвективную оболочку, заштрихованную на рис. 1.

Между вспышками красный компонент системы VW Гидры вращается, предположительно твердотельно, с периодом 104 минуты, что соответствует несинхронному вращению в прямом направлении с периодом

2,85 суток. Периодические вариации ускорения силы тяжести и приводят к задержке в конвективной оболочке части энергии, произведенной стационарными внутренними источниками [13, 14]. По мере накопления энергии верхние слои конвективной зоны оказываются все более и более поднятыми по сравнению с начальным положением. В результате возникает дифференциальное по глубине вращение. К началу вспышки период вращения фотосферы составляет 110 минут и более, что соответствует несинхронному вращению в обратном направлении.

Несомненно, что когда-то перед началом вспышки существует интервал времени, когда реализуется синхронное вращение. Тогда динамические приливы прекращаются. Различные секторы конвективной зоны оказываются надолго в условиях существенно различного ускорения силы тяжести. У рассматриваемых звезд разница может достигать десятков процентов.

Если в течение этого времени накопленная энергия прорвется на поверхность, то это произойдет именно в окрестности точки С или D, что и ведет к образованию горячего пятна. Очевидно, может образоваться и пара пятен, тогда они расположены приблизительно на концах одного диаметра звезды. Если за это время прорыва энергии не произошло, то вновь наступившее несинхронное вращение будет стремиться уравнивать условия в различных секторах конвективной зоны и позднее энергия будет выходить равномерно вдоль экваториального пояса звезды.

Будет ли образовавшееся пятно устойчивым? Точное исследование этой проблемы — дело будущего, сейчас можно только высказать ряд соображений в пользу устойчивости пятна.

Благодаря дифференциальному вращению различных по глубине слоев красного карлика в эпоху вблизи максимума вспышки лучистое ядро звезды успевает провернуться один раз относительно горячего пятна за время около 1,35 суток или $\sim 10^5$ с. Это следует из сравнения периодов вращения поверхности звезды в минимуме, равном 104 минутам, и в максимуме блеска, равном 110 минутам. Замедление вращения касается только околофотосферных слоев. Относительно более глубокие области вращаются с неизменным периодом.

Сравним средние времена выхода излучения из области, где содержится накопленная энергия, через слой холодной конвективной зоны и через горячее пятно.

В работе [12] приведены формулы для вычисления \bar{t} времени диффузии кванта с некоторой глубины x , из-под фотосферы на поверхность звезды, где $x = 0$. На их основе можно получить:

$$\bar{t} \approx 10^{35} \int_0^{x_1} \frac{\rho dx}{T^3} \int_0^x \frac{\rho^2 dx}{T^{7/2}} \quad (7)$$

Учитывая, что в звездах изучаемого здесь типа плотность ρ связана с температурой T соотношением (4), взяв зависимость температуры от глубины в невозмущенном слое в виде

$$T(x) = \frac{g}{C_p} x + T_0 \approx 10^{-3} x + 5 \cdot 10^3, \quad (8)$$

в результате двукратного интегрирования в формуле (7), для времени выхода излучения с глубины $x = 10^7$ см сквозь холодный слой газа получим $\bar{t} = 6 \cdot 10^3$ с.

В области горячего пятна температура поверхности составляет $1.5 \cdot 10^4$ К, так что в целях оценки можно полагать, что в среднем под горячим пятном до глубины 10^7 см температура в два раза выше, чем у окружающих его областей. Из условия равенства давления в невозмущенной и в прогретой частях конвективной зоны, находящихся на одинаковой высоте, следует, что средняя плотность вещества под горячим пятном должна стать в 2 раза меньше первоначальной. Из общей структуры формулы (7) видно, что повышение температуры и падение плотности в 2 раза приводит к уменьшению величины \bar{t} на 2—3 порядка.

Из-за дифференциального вращения глубоких областей звезды относительно горячего пятна с периодом $\sim 10^5$ с через образовавшийся единственный «клапан» может высвечиваться энергия, запасенная подо всей конвективной зоной. Если пятно имеет размер, равный радиусу звезды, то каждый участок, содержащий дополнительную энергию, оказывается вблизи горячего пятна в течение $1/6$ части указанного периода, но зато время выхода этой энергии через «клапан» в сотни раз меньше.

В целом, вероятность выхода кванта через горячее пятно кажется существенно больше вероятности его выхода через оставшийся холодным слой газа. Поэтому после образования пятна утоньшение остальной части конвективной оболочки замедляется, а это и означает устойчивость пятна.

Этому же способствует и то обстоятельство, что, по сделанным выше оценкам, пятно излучает в секунду несколько больше энергии, чем производят внутренние источники, так что «напор» запасенной энергии на конвективную зону сразу начнет слабеть, как только образуется горячая область.

4. Заключение. В предыдущих разделах было показано, что предложенная модель сверхгорбов с единых позиций объясняет переменность их периода, в частности, его отличия от орбитального периода, а также причины разделения вспышек звезд типа U Близнецов на два вида.

Помимо этого здесь можно отметить, что получило естественное объяснение совпадение времени существования сверхгорбов с длительностью больших вспышек. Во всех известных ранее объяснениях на это не обраща-

лось должного внимания. Теперь ясно, что присутствие яркого пятна свидетельствует, что еще не вся накопленная энергия высветилась, значит радиус спутника увеличен, и вспышка должна продолжаться.

Понятным становится, почему сверхгорбы обнаружены пока только у звезд типа SU Большой Медведицы, у самых тесных двойных из всех карликовых новых звезд. Дело в том, что свечение яркого пятна наблюдается на фоне вспышки, энергия которой черпается из потенциальной энергии газа, падающего на дискообразную оболочку. Чем больше оказывается расстояние между компонентами системы, тем больше энергии, при прочих равных условиях, выделяется в дискообразной оболочке и тем менее заметным делается яркое пятно.

При повышении точности наблюдений следует ожидать открытия сверхгорбов во время больших вспышек и у классических звезд типа U Близнецов, но там их период может оказаться в два раза короче орбитального, так как высвечивание накопленной энергии может происходить через пару горячих пятен, расположенных симметрично центру звезды.

И, наконец, отметим, что не исключено образование у звезды такого одиночного пятна, что через него и остальную более холодную поверхность будет излучаться в точности то же количество энергии, какое производится источниками. Такая конфигурация могла бы сохраняться гораздо дольше, чем длятся типичные большие вспышки. Не исключено, что подобным образом объясняются сверхдлинные промежутки активности у звезды Z Жирафа.

Лесотехническая Академия
им. С. М. Кирова, Ленинград

ON THE ORIGIN OF TWO TYPES OF OUTBURSTS OF THE U GEMINORUM STARS AND THE MECHANISM OF THE SUPERHUMPS

L. N. IVANOV

It is supposed that outburst of U Gem stars exist because of quasiperiodical accumulation and release of energy in the deep layers of the cold component of the system. The assumption is made on the possibility of spotlike release of energy through the convective envelope of the cold component. The smaller the spot the longer the outburst, because of the longer outflow of the mass from the red star. The rotation of the star with hot spot on its surface manifests as a superhump. If energy would run out of many spots, the outburst would be small and the optical variations of the the superhumps would be

negligible. The natural consequence of that model is the variations of the period of the superhumps. The interpretation of beat phenomenon leads to the revelation of direct asynchronous rotation of the VWHyd red component with the period of 2.85 days.

ЛИТЕРАТУРА

1. *L. Martel*, *Ann. Astrophys.*, 24, 267, 1961.
2. *N. Vogt*, *Astron. Astrophys.*, 36, 369, 1974.
3. *B. Warner*, *M.N.RAS*, 170, 219, 1975.
4. *N. Vogt*, *ESO Sci. preprint No. 73*, 1979.
5. *R. Haefner*, *R. Schoembs*, *N. Vogt*, *ESO Sci. preprint No. 33*, 1978.
6. *В. Г. Горбачкий*, *Письма АЖ*, № 1, 23, 1975.
7. *B. F. Martino*, *B. Walker*, *IAU Inf. Bull. Variable Stars*, 864, 1974.
8. *В. Г. Горбачкий*, *Л. Н. Иванов*, *Астрофизика*, 10, 74, 1974.
9. *R. Schoembs*, *N. Vogt*, *ESO Sci. preprint*, No. 86, 1980.
10. *J. C. Papolitsoou*, *J. E. Pringle*, *M.N.RAS*, 189, 293, 1979.
11. *J. Patterson*, *J. McCraw*, *L. Coleman*, *J. Africano*, *Ap. J.*, 248, 1067, 1981.
12. *В. Г. Горбачкий*, *Новоподобные и новые звезды*, Наука, М., 1974.
13. *В. Г. Горбачкий*, *Астрон. ж.*, 48, 676, 1971.
14. *Л. Н. Иванов*, *Вестн. ЛГУ*, № 13, 126, 1972.