

ОКОЛОЗВЕЗДНОЕ ВЕЩЕСТВО В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ  
ТИПА АМ ГЕРКУЛЕСА

Н. Ф. Войханская, Ю. Н. Гнедин\*

Совокупность наблюдательных данных о переменности основных характеристик излучения тесных двойных систем типа АМ Геркулеса объясняется на основе модели, в которой учитывается наличие околозвездного вещества в такой системе. Рассмотрены следующие возможности: существование магнитосферы вокруг белого карлика, отток вещества из окрестности полюсов магнитного белого карлика под действием радиационного давления с учетом циклотронного резонанса, существование околозвездного вещества в виде общей оболочки. Обсуждаются наблюдательные эффекты, обусловленные этими возможностями: искажение кривых лучевых скоростей, изменение бальмеровского декремента, а также вариации рентгеновского потока.

*The observational data on the variability of the main characteristics of AM Her type close binaries are interpreted on the basis of a model suggesting the presence of a circumstellar matter in such systems. The following circumstances are considered: the presence of the magnetosphere around the white dwarf, the outflow of the matter in the vicinity of the magnetic white dwarf poles due to the radiation pressure with account for the cyclotron resonance, the presence of the circumstellar matter as a common shell. The following observational effects caused by the above mentioned circumstances are discussed: distortion of radial velocity curves, the Balmer decrement variation and the X-ray flux variation.*

## 1. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

К настоящему времени накопилось много наблюдательных фактов о переменности всех характеристик систем типа АМ Her (полярнов), которые трудно объяснить в рамках стандартной модели, по которой полярны состоят из трех компонентов: двух карликовых звезд и газовой струи между ними. Попытки усложнения формы струи в рамках традиционной модели мало помогают, тем более что, например, переменность линий излучения часто наблюдается при практически постоянном полном блеске системы. В работе Шмидта и др. (1986) сделано заключение, что резкие границы аккреционной колонки не позволяют объяснить распределение и поляризацию в оптическом континууме и что колонку надо окружить более разреженной материей, аккрецирующей на довольно большую

\* Главная астрономическая обсерватория АН СССР, Ленинград, Пулково

поверхность вокруг магнитного полюса. По нашему мнению, для объяснения наблюдений необходимо в модель полярных добавит четвертый компонент - околозвездное вещество (ОЗВ). Количество и распределение ОЗВ в объеме двойной системы должно меняться со временем.

Для околозвездного вещества будем придерживаться определения Бэттена (1976): "околозвездное вещество - это вещество, находящееся по соседству с двойной системой и выброшенное одной из компонент, но временно или постоянно принадлежащее всей системе в целом". Проявления околозвездного вещества могут быть различными. Если хотя бы один из компонентов системы заполняет свою полость Роша, то он будет терять вещество и период системы будет изменяться. Достаточно большие количества вещества могут вызвать появление в спектре дополнительных слабых линий излучения или поглощения. Это вещество может проявить себя и в изменении профилей линий объекта и в искажении кривых лучевых скоростей. Изменение количества околозвездного вещества и условий возбуждения в нем должны проявиться в изменении формы бальмеровского декремента, изменении зависимостей  $W-\varphi$  и  $I-\varphi$  для линий излучения и в том, что кривые лучевых скоростей по линиям разных элементов будут различаться между собой. Влияние околозвездного вещества скажется также в искажении кривых блеска систем, причем эти искажения будут изменяться со временем.

В настоящем сообщении речь пойдет об обнаружении ОЗВ в основном спектроскопическими методами.

Наши исследования и анализ литературных данных показали, что искажение кривых лучевых скоростей - явление очень распространенное у систем типа AM Her. Не было ни одной системы, у которой хотя бы иногда не наблюдались изменения в кривых лучевых скоростей. Говоря об изменении кривых, имеют в виду три вида искажений: изменение формы и амплитуды кривой, сдвиг по фазе экстремумов кривой и изменение  $\gamma$ -скорости.

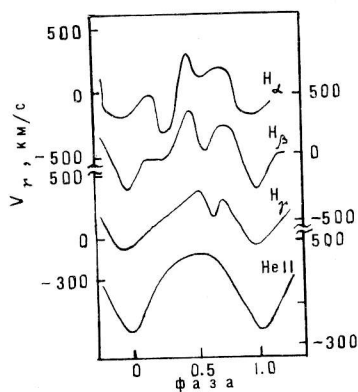


Рис. 1. Кривые лучевых скоростей AN UMa, построенные по разным линиям. Для  $H_\alpha$  и  $H_\gamma$  шкала слева, для  $H_\beta$  и He II  $\lambda$  4686 - справа. Ошибка определения скорости  $\pm 20$  км/с.

Смещение экстремумов кривых лучевых скоростей наблюдается довольно часто. В большинстве случаев это, по-видимому, случайный процесс. Однако в некоторых случаях в сдвигах кривых обнаруживается периодичность (Войханская и др., 1987). Особого внимания заслуживает изменение  $\gamma$ -скорости (правильнее было бы называть ее просто средней скоростью). Ее величина у одной и той же системы изменяется в очень больших пределах, до нескольких сотен км/с. Например, у полярна E 2003+225 зарегистрировано изменение  $\gamma$ -скорости, равное 1000 км/с.

Различие формы кривых, построенных по разным линиям, и их искажение оказались также обычным явлением у систем типа AM Her.

На рис. 1 показаны кривые лучевых скоростей системы AN UMa, построенные по разным линиям (Войханская, 1986). Видно, что искажения кривых по первым бальмеровским линиям очень велики и уменьшаются с увеличением потенциала возбуждения линии. Чтобы исказить кривую лучевой скорости, в системе должно присутствовать вещество, вектор скорости которого отличен от скорости орбитального движения и движения потока. У системы AM Her летом 1981 г. наблюдались необычно сильные искажения кривых лучевых скоростей (рис.2). Это было время, когда система находилась в высоком состоянии блеска после продолжительного низкого состояния в 1980 г. Кривые  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$  искажены настолько сильно, что большую часть периода скорость практически постоянна. Это значит, что область излучения линий  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$  удалена от компонентов системы, что она как бы "забыла" о всех движениях в системе, т.е. большую часть периода видно ОЗВ. Для сравнения на рис.2 показана кривая, наблюдавшаяся в 1978 г. Это простая синусоида без каких-либо искажений.

Рис.2. Кривые лучевых скоростей AM Her по пикам эмиссионных линий в 1981 г. (две верхние кривые) и в 1978 г. (нижняя кривая): точки - по линиям HeI,  $H_{\gamma}$  и  $H_{\delta}$ ; кружки - по  $H_{\beta}$ ; треугольники - по  $H_{\alpha}$ ; крестики - по линиям H и HeI. Ошибка определения скорости  $\pm 15$  км/с.

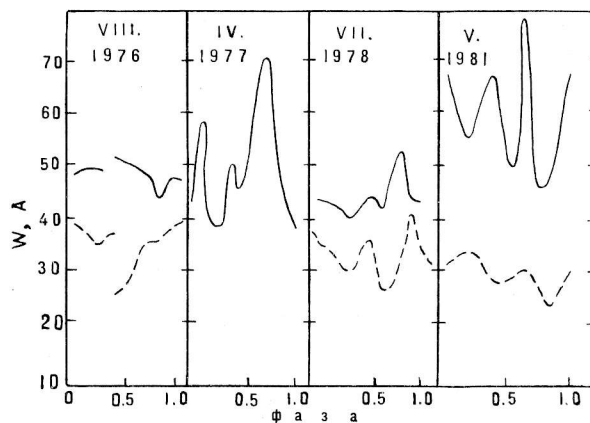
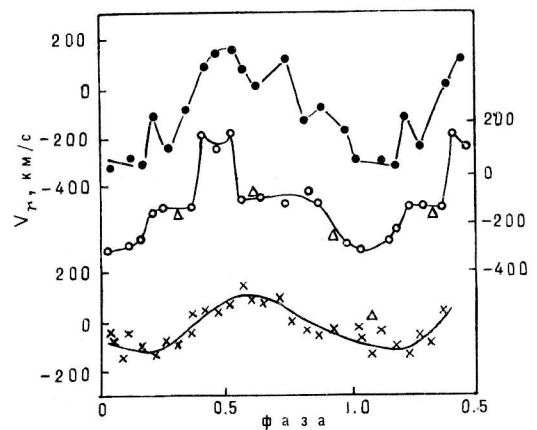


Рис.3. Изменения эквивалентных ширин  $H_{\beta}$  (сплошная линия) и He II  $\lambda$  4686 (штрихи) в течение орбитального периода в разное время. Ошибка определения величин W составляет 10-15 %.

Прямым доказательством присутствия в системе околозвездного вещества явилось бы обнаружение околозвездных линий в спектре. Трудность состоит в том, что ожидаемые линии слабы и их надо выделять на фоне шумов светоприемной аппаратуры и слабых линий объекта и неба. Из-за этих трудностей околозвездные

линии обнаружены в спектрах очень немногих систем. Не только кривые лучевых скоростей меняются со временем. Изменение эквивалентных ширин и интенсивностей линий в течение орбитального периода у всех полярных звезд оказалось переменным, т.е. не только распределение и движение ОЗВ меняются со временем, но также и его количество в системе. Для примера на рис.3 показано изменение эквивалентных ширин у AM Her, наблюдавшееся в разное время. Изменение физических условий околозвездного вещества проявляется в изменении формы бальмеровского декремента. На рис.4 показаны бальмеровские декременты, наблюдавшиеся в разное время у AM Her. Они столь различны, что без труда можно проследить смену механизмов возбуждения в оболочке от чисто радиационного до ударного, то есть изменение электронной плотности в оболочке на несколько порядков. Подобные изменения декрементов наблюдаются не только при изменении блеска системы, но и при постоянном ее блеске.

При понижении блеска системы эмиссионные линии в ее спектре ослабевают и могут исчезнуть. При этом первыми ослабевают и исчезают линии высокого возбуждения. Линии низкого возбуждения могут присутствовать в спектре долгое время. На рис.5 показано изменение эквивалентных ширин некоторых линий в спектре AM Her летом 1980 г., когда система продолжительное время оставалась в низком состоянии. Видно, что эквивалентная ширина линии  $H_{\alpha}$  очень медленно уменьшалась в течение более двух месяцев, хотя система давно была уже в низком состоянии блеска и основной источник энергии давно "выключился". Это означает, что в системе имеется какая-то разреженная газовая среда, которая медленно высвечивается продолжительное время.

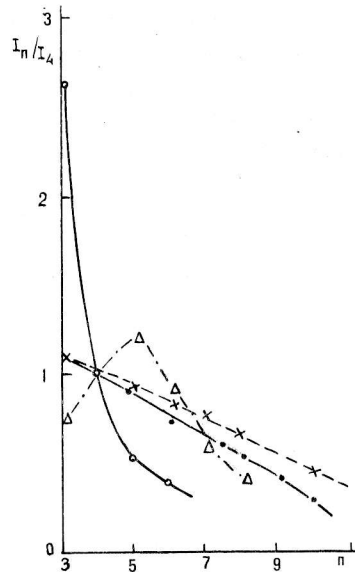


Рис.4. Бальмеровские декременты, наблюдавшиеся в разное время у AM Her.

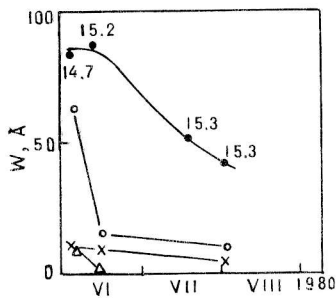


Рис.5. Изменение эквивалентных ширин разных линий во время низкого состояния AM Her летом 1980 г. Рядом с кривой для  $H_{\alpha}$  указан блеск системы.

обозначения:  $\circ$  -  $H_{\beta}$ ;  $\bullet$  -  $H_{\alpha}$ ;  
 $\times$  - He I  $\lambda$  5876;  
 $\Delta$  - He II  $\lambda$  4686.

## 2. ФОРМА СУЩЕСТВОВАНИЯ ОКОЛОЗВЕЗДНОГО ВЕЩЕСТВА

Околос звездное вещество может существовать как в виде динамически сильно меняющихся газовых потоков внутри двойной системы, так и в виде более консервативной оболочки, в которую погружена сама система (см., например, Пустыльник и Эйнасто, 1984). Последняя может возникнуть в результате потери вещества системой через внешние точки Лагранжа (Савада и др., 1986), а также в результате оттока вещества с поверхности белого карлика (в области аккреции) под действием радиационного давления, усиленного влиянием магнитного поля (Митрофанов и Павлов, 1981; Гнедин и Нагель, 1984; Митрофанов, 1987). Проанализируем более детально обе эти возможности.

Начнем с анализа возможности существования магнитосферы вокруг замагниченного белого карлика.

### а) Магнитосфера белого карлика

Характерной особенностью магнитных двойных систем (объектов типа AM Her - поляров) считается то обстоятельство, что при большом магнитном поле белого карлика и недостаточно высоком темпе аккреции  $\dot{M}$  альвеновский радиус

$$R_A^d \approx 1.39 \times 10^{11} \mu_{35}^{4/7} M_{17}^{-2/7} m_x^{-1/7} \quad (1)$$

оказывается больше не только радиуса гравитационного захвата

$$R_G \approx 10^{10} m_x v_8^{-2}, \quad (2)$$

но и расстояния между звездами в ТДС. В этом случае второй компонент системы (красный карлик) как бы погружен внутрь магнитосферы белого карлика (Митрофанов и др., 1977).

Здесь введены следующие обозначения:

$m_x$  - масса белого карлика в единицах массы Солнца,

$\mu$  - его магнитный момент,

$v$  - относительная скорость аккрецируемого вещества.

Формула (1) справедлива только в случае сферически симметричной аккреции на компактную звезду с дипольным магнитным полем. В случае магнитного поля  $B \sim 3 \cdot 10^7$  Гс, радиуса белого карлика  $10^9$  см и его массы  $m_x = 0.5$  радиус магнитосферы  $R_A^d \approx 6.3 \times 10^{10}$  см. Эта величина действительно сравнима с расстоянием между компонентами.

Однако в реальных условиях ТДС типа AM Her аккреция не является сферически симметричной, а носит сложный динамический характер (струи, несферический газовый поток).

В качестве первого грубого приближения можно рассмотреть режим двухпотоковой аккреции (Липунов, 1980, 1987). Например, нормальная звезда заполняет свою полость Роша и истекает через внутреннюю точку Лагранжа в виде узкой струи. Вещество, текущее в ней, обладает значительным угловым моментом и образует дисковый поток вокруг белого карлика, при этом из нормальной звезды может истекать (например, из внешней точки Лагранжа) другая струя с большей угловой шириной и с другой скоростью истечения. Если скорость вещества в этой струе значительно превышает орбитальную, то вращательный момент захваченного

вещества окажется мал, и вблизи белого карлика оно будет двигаться практически радиально. В результате в ТДС на расстояниях от белого карлика  $R \ll R_G$  будут присутствовать два взаимодействующих потока вещества, и аккреция будет иметь сложный характер.

Для того, чтобы оценить радиус магнитосферы в этом случае, воспользуемся результатами работы Липунова (1980). Согласно Липунову (1980), при расчете формы магнитосферы следует заменить магнитное поле диполя, обжатого тонким дисковым потоком, квадруполем с моментом

$$\mu_d = \frac{8}{3\pi} \mu R_d, \quad (3)$$

где  $R_d$  - внутренний радиус дискового потока. Естественно, магнитосфера становится существенно несферической, а ее максимальный радиус равен (Липунов, 1980):

$$R_A^q = \left( \frac{32 \mu^2 R_d^2}{9 \pi^2 \dot{M} \sqrt{2GM_x}} \right)^{2/11} \approx 2.66 \cdot 10^{10} \mu_{35}^{4/11} (R_d)_9^{4/11} m_x^{-1/11} \dot{M}_{17}^{-2/11}. \quad (4)$$

Таким образом, в принципе возможно образование магнитосферы вокруг белого карлика с радиусом  $\approx 25$  радиусов белого карлика.

В случае, когда движение частиц плазмы вблизи магнитосферы изотропизировано вследствие столкновений или хаотических магнитных полей и давление в ней подчиняется закону Паскаля:  $P = P_0 (R_0/R)^n$ , под альвеновским радиусом следует понимать величину (Липунов, 1987)

$$R_A = \left( \frac{\mu^2}{8 \pi P_0 R_0^n} \right)^{1/6-n}. \quad (5)$$

Классический режим аккреции (нерадиальной) осуществляется при условии  $R_A \ll R_G \leq d$ , где  $d$  - расстояние между компонентами. В случае полярной такой режим может устанавливаться только при условии, что скорость истечения вещества  $V$  существенно меньше  $10^8$  см/с (см. формулу (2)).

Если же  $V \approx 10^8$  см/с, то, согласно (1), (2) и (4),  $R_G < R_A$ . Тогда возможны две ситуации. Если скорость движения белого карлика относительно аккрецируемого вещества существенно сверхзвуковая  $V \gg a_s$ , то магнитосфера белого карлика будет похожа на магнитосферу Земли: аккрецируемый поток обтекает ее, образуя длинный хвост - "режим георотатора" (Липунов, 1987). Если же  $V \ll a_s$  и в то же время  $R_G < R_A$ , то реализуется режим, впервые описанный Колом и Хазом (1959), а затем Мидгли и Дэвисом (1962).

Во всех рассмотренных случаях вблизи замагниченного белого карлика возможно образование облака плазмы той или иной геометрической конфигурации, которое будет существенно искажать кривую лучевых скоростей.

Оценим параметры этого облака, а также его влияние на излучение непрерывного спектра в различных его диапазонах.

Плотность вещества в магнитосфере равна:

$$n \approx \frac{\dot{M}}{4 \pi R^2 V m_p} \approx 4.8 \cdot 10^{11} \dot{M}_{17}^{-1} V_8^{-1} R_{10}^{-2}. \quad (6)$$

Таким образом, плотность вещества в магнитосфере может достигать  $n \sim 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Температура, соответствующая энергии гравитационного движения, равна:

$$T_{ff} = \frac{GM_x m_p}{KR} \approx 1.6 \times 10^8 R_{10}^{-1} m_x. \quad (7)$$

Полная светимость оболочки в результате тормозного излучения составляет:

$$L_{ff} = 1.6 \cdot 10^{-27} n^2 V \sqrt{T} \approx 6.7 \times 10^{30} n_{12}^2 R_{10}^3 T_6^{1/2} \text{ эрг/с.} \quad (8)$$

Таким образом, такая оболочка может являться заметным источником мягкого рентгеновского излучения с мощностью на уровне:

$$L_{ff} \approx 10^{31} - 10^{33} \text{ эрг/с.}$$

В этом случае снимается трудность объяснения отклонений наблюдаемых у ряда объектов отношений светимости мягкого рентгеновского излучения  $L_{sx}$  к светимости в жестком рентгеновском  $L_{hx}$  и в оптическом  $L_0$  диапазонах. В стандартной модели (см, например, Либерт и Стокман, 1985) эти отношения равны:  $L_{sx} / L_{hx} \sim L_{sx} / L_0 \sim 1$ .

В стандартной модели считается, что мягкое рентгеновское излучение возникает в результате переработки жесткого рентгеновского излучения аккреционной колонки на поверхности белого карлика. Наблюдения же дают:  $L_{sx} / L_0 \sim 10$  и даже  $L_{sx} / L_0 \sim 150$ , т.е. требуется дополнительный источник излучения мягких рентгеновских квантов. Таким дополнительным источником и может явиться альвеновская зона вокруг магнитного белого карлика.

Хотя максимальная оптическая толщина такой оболочки по отношению к электронному рассеянию  $\tau_T$  не превышает 0.3, она тем не менее может иметь заметное фотопоглощение, обусловленное, главным образом, кислородом, в области энергии 0.6 - 5 кэВ. Эффективная оптическая толщина такой оболочки для мягких рентгеновских квантов может быть также достаточно велика  $\sim 0.1 E_{кэВ}^{-3/2}$  (МакКрей и Лэмб, 1976). Таким образом, возможно частичное поглощение такой оболочкой рентгеновского излучения, возникающего в области магнитных полюсов белого карлика.

Другое возможное наблюдательное следствие такой оболочки - это эффект Фарадеевского поворота плоскости линейной поляризации оптического излучения аккреционной колонки, который, в частности, может вызвать и полную деполяризацию излучения. Угол поворота:

$$\Delta \Psi = 2.62 \cdot 10^{-17} \lambda^2 n_{11} B_{11} R \approx 0.66 \left( \frac{\lambda}{5 \cdot 10^{-5}} \right)^2 \left( \frac{n}{10^{11}} \right) \left( \frac{B_{11}}{10^4} \right) \left( \frac{R}{10^{10}} \right). \quad (9)$$

Эффект Фарадеевского поворота плоскости поляризации излучения EF Eri наблюдали Пирола и др. (1987).

#### б) Истечение вещества из окрестности полюсов магнитного белого карлика

Вблизи магнитных полюсов белого карлика возможен отток вещества, который

сильно искажает кривую лучевых скоростей. Этот отток происходит в результате радиационного давления, сила которого может существенно увеличиваться за счет возрастания сечения рассеяния фотона электроном в магнитном поле вблизи гирочастоты:

$$\omega_B = \frac{eB}{m_e c} = 1.76 \cdot 10^7 B \quad (10)$$

(Митрофанов и Павлов, 1982; Гнедин и Нагель, 1984; Железняков и Литвинчук, 1986; Митрофанов, 1987). В результате значение критической светимости или эддингтоновского предела значительно снижается по сравнению с классическим эддингтоновским пределом, соответствующим чисто томсоновскому рассеянию. Причем, если поток излучения магнитного белого карлика превысит критическое значение, вычисленное с учетом циклотронного резонанса, то под действием давления излучения прилегающий к поверхности белого карлика в области магнитных полюсов излучающий слой плазмы (фотосфера, аккреционная колонка) становится нестабильным, что и вызывает отток вещества из области магнитных полюсов. Этот механизм будет действовать эффективно, если гирочастота попадает в оптический диапазон излучения. Это требует значений магнитного поля на поверхности белых карликов, лежащих в диапазоне:

$$B = 3.57 \cdot 10^{-7} \nu \approx 8.6 \cdot 10^7 - 2.9 \cdot 10^8 \text{ (Гс)}. \quad (11)$$

в) Околос звездное вещество в виде общей оболочки

Потеря вещества ТДС через внешние точки Лагранжа может привести к образованию общей протяженной оболочки вокруг ТДС. Причем такая оболочка наверняка не будет сферически-симметричной, а также стационарной.

Кривые лучевых скоростей и блеска ТДС, погруженной в общую электронную оболочку, зависят от следующих параметров: оптической толщины, размера орбиты, отношения масс компонентов, угла наклона орбиты, отношения светимостей компонент, значения радиального градиента непрозрачности оболочки, коэффициентов потемнения к краю звездных атмосфер и т.д.

В рамках модели околос звездной оболочки, в которую погружена ТДС, вполне находят свое объяснение такие peculiarity кривых лучевых скоростей и блеска, как их разнообразные искажения, асимметрия, локальные флуктуации, сдвиги моментов минимумов относительно моментов элонгаций, сложные цветовые изменения и т.д. Многочисленные наблюдательные данные, описанные выше, накладывают определенные ограничения на электронную плотность такой общей оболочки. Она не должна заметно превышать  $10^{11} - 10^{12}$  см.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бэттен (Batten A.): 1976, in: *Binary and Multiple Systems of Stars*, Pergamon Press.
- Войханская Н. Ф.: 1986, *Астрон. ж.*, 63, с. 516.
- Войханская Н. Ф., Гнедин Ю. Н., Борисов Н. В., Нацвлишвили Т. М., Фабрика С. Н. 1987, *Письма в астрон. ж.*, 13, с. 495.



- Гнедин и Нагель (Gnedin Yu. N., Nagel W.): 1984, *Astron. Astrophys.*, 138, p. 356.
- Железняков В. В., Литвинчук А. А.: 1987, *Астрон. ж.*, 64, с.306.
- Кол и Хаз (Cole J. D., Huth J. H.): 1959, *Phys. Fluids*, 2, p.624.
- Либерт и Стокман (Liebert J., Stockman H. S.): 1985, in: *Cataclysmic Variable and Low mass X-Ray Binaries*, eds: D. Q. Lamb and J. Patterson Dordrecht: Reidel.
- Липунов В.М.: 1980, *Астрон. ж.*, 57, с.1253.
- Липунов В.М.: 1987, *Астрофизика нейтронных звезд*, Москва.: Наука.
- МакКрей и Лэмб (McCray R., Lamb F. K.): 1976, *Astrophys. J.*, (Lett.), 240, L115.
- Мидгли и Девис (Medgley J., Davis L.J.): 1962, *J. Geophys. Res.*, 67, p.499.
- Митрофанов И. Г. (Mitrofanov I. G.) : 1987, *Astrophys. Space Sci.*, 132, p.155.
- Митрофанов и Павлов (Mitrofanov I. G., Pavlov G. G.) : 1982, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 200, p.1033.
- Митрофанов И. Г., Павлов Г. Г., Гнедин Ю. Н.: 1977, *Письма в астрон. ж.*, 3, с.341.
- Пирола и др. (Pirolo V., Reiz A., Coyne G.): 1987, *Astron. Astrophys.*, 186, p.120.
- Пустыльник И. Б., Эйнасто Л. А.: 1984, *Астрон. циркуляр*, 1305 с.1.
- Савада и др. (Sawada K., Matsuda T., Nachisu I.): 1986, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 219, p.75.
- Шмидт и др. (Schmidt D., Stockman H.D., Grandi S.A.): 1986, *Astrophys. J.*, 300, p.804.

Поступила в редакцию  
5 марта 1990 г.