

УДК: 524.338.5

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ A_e -ЗВЕЗД ХЕРБИГА С P Cyg-ПРОФИЛЕМ БАЛЬМЕРОВСКИХ ЛИНИЙ

М. А. ПОГОДИН

Поступила 24 июля 1989
Принята к печати 10 июня 1990

Рассмотрены два типа моделей околозвездной оболочки звезды класса A0V, объясняющие наблюдаемую у A_e -звезд Хербига переменность профиля линии H_α . Один тип моделей предполагает существование в дисковой вращающейся и расширяющейся оболочке магнитосферы с твердотельным вращением. Другой — распространение в такой оболочке струи повышенной плотности. Оба типа моделей основываются на том, что у A_e -звезд Хербига имеются магнитные поля.

1. *Введение.* Группа A_e/V_e -звезд Хербига была выделена около 30 лет назад для поиска молодых звезд средних масс [1]. Она включала звезды спектральных классов B—F с эмиссионными линиями, расположенные в районах звездообразования и ассоциирующиеся с туманностями.

Первоначальный список Хербига содержал 26 объектов, впоследствии, в обзоре Финкенцеллера и Мундта [2], он был расширен примерно вдвое. Многочисленные исследования звезд Хербига, проводимые в 60—80-х годах, показали, что эта группа не вполне однородна по физическим признакам. Однако внутри ее существует достаточно однородная подгруппа из 10—15 звезд, имеющих ярко выраженные P Cyg-профили эмиссионных водородных линий. Спектральные классы этих объектов сосредоточены в довольно узком интервале B8—A2, характерные амплитуды их оптической переменности в среднем значительно выше, чем у остальных объектов Хербига. По многим признакам звезды Хербига с P Cyg-профилями линий близки к звездам типа T Тау, к которым эта подгруппа непосредственно примыкает на диаграмме Герцшпрунга—Рассела со стороны высоких температур [2].

Результаты более детального исследования отдельных звезд подгруппы свидетельствуют об их сходстве по многим физическим параметрам. Так, в работе [3] был проведен анализ структуры оболочки у четырех

объектов этого типа, где рассматривались характеристики эмиссионных линий Mg II , H_α , Ca II и Na I , образующихся в различных частях оболочки. При этом использовались данные наблюдений в видимом, ИК и УФ (со спутника IUE) диапазонах спектра. Оказалось, что оболочки всех исследованных объектов имеют сходную структуру. В каждой из них присутствует хромосфера с температурой $15\,000\text{--}20\,000\text{ K}$ и протяженная внешняя область, где температура монотонно падает к периферии до приблизительно 5000 K .

Общность природы оболочек звезд Херbiga с P Cyg-профилями эмиссионных линий подтверждается одним весьма характерным для них типом спектральной переменности, наблюдаемой у многих объектов этой подгруппы. Эта переменность присутствует у балмеровских линий водорода, наиболее ярко проявляясь у H_α . В какой-то момент времени абсорбционный компонент классического PCyg-профиля (II типа по классификации Билса [4]) начинает смещаться к центру линии, а с ее коротковолновой стороны появляется вторичный эмиссионный максимум (профиль P Cyg III Beals). Через какое-то время профиль II типа восстанавливается вновь. Примеры подобных изменений, взятые из опубликованных работ [2, 17], показаны на рис. 1.

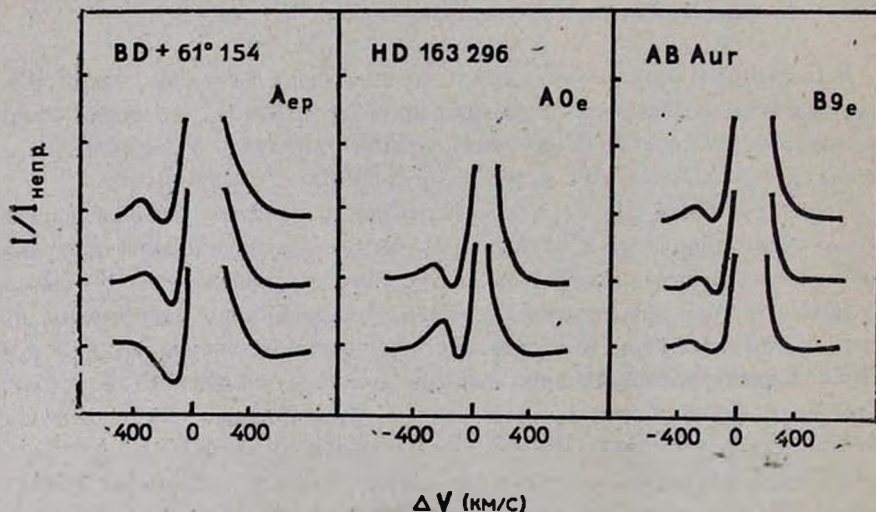


Рис. 1. Характерные изменения вида профиля линии H_α у некоторых A_e -звезд Херbiga по данным работ [2, 17]. Интервал между наблюдениями порядка одного или нескольких месяцев.

Целью настоящей работы было рассмотреть некоторые процессы, которые могли бы быть причиной этого типа переменности, и попытаться проанализировать возможности ее модельной интерпретации.

2. *Модели околосветидной оболочки.* В настоящее время наиболее разработанной моделью для оболочек, характерных для А_c-звезд Хербига с Р Суг-профилями линий, является полумпирическая модель, описанная в серии работ [5—9]. Рассматривая нонивадионную структуру оболочки для различных излучающих атомов, авторам удалось удовлетворительно согласовать в рамках однородной сферически-симметричной модели параметры линий Mg II [5], Si IV и CIV [6, 8], OI [9] в спектре наиболее яркой звезды этого типа—AB Aug. Был получен также теоретический профиль линии H_α [7], соответствующий наблюдаемому Р Суг-профилю II типа, за исключением абсорбционного компонента, который во всех вариантах оказывался систематически глубже, чем наблюдаемый.

Эта модель позволила достаточно однозначно построить температурный ход в оболочке AB Aug, включая область хромосферы ($1 < r/R_* < 2.5$, $T_* \sim 16000$ — 18000 K) и звездного ветра ($2.5 < r/R_* < 70$, T_* от 10000 до 3000 K), а также оценить скорость потери массы $\dot{M} = 1 + 2 \times 10^{-8} M_\odot$ год. Менее определенным оказалось распределение скорости

расширения оболочки $v_p(r)$, особенно в ее внешних областях. Во всех расчетах был использован закон, соответствующий расширению с ускорением, это позволило обеспечить непрерывность кинематических характеристик при переходе от неподвижной фотосферы к движущейся оболочке. Между тем, наблюдаемые в спектрах этих звезд профили линии Na ID, λ 5889, образующейся на периферии, свидетельствуют о существовании зоны, где расширение должно смениться замедлением [2]. Обсуждая это обстоятельство, авторы [5] сделали предположение, что граница между зонами ускоренного и замедленного расширения находится на большом расстоянии от звезды ($r \gtrsim 50 R_*$), однако допускали возможность и другого типа кинематики.

В целом, рассмотренная модель, хорошо объясняя наблюдаемые спектральные характеристики AB Aug, взятые в определенный момент времени, не может быть использована для интерпретации их переменности. В серии работ [10—12], где проводится анализ периодических изменений некоторых спектральных деталей в профилях резонансных линий Mg II [10, 12], Ca II [11] и CIV [12], был сделан вывод, что переменность является следствием дифференциального вращения оболочки, имеющей секторную неоднородность. Причиной подобной неоднородности может быть существование плотных струй, возникающих в оболочке благодаря наличию у звезды локальных магнитных полей. Физическое обоснование образования в оболочке струйной структуры приводится, в частности, в работе Маллена [13]. В [7] отмечается также, что именно



секторная неоднородность может быть причиной расхождения между теоретическими и наблюдаемыми профилями линии H_α .

Таким образом, для модельной интерпретации спектральных особенностей A_α -звезд Хербига с P Cug-профилями линий, включая и их переменность, требуется, вообще говоря, достаточно сложная модель оболочки, которая, по-видимому, является эллипсоидом вращения с секторной неоднородностью, имеющим некоторый наклон оси вращения к лучу зрения. Полный набор свободных параметров такой модели слишком велик, это делает ее неудобной для исследования эффектов наблюдаемой спектральной переменности.

Один из вариантов упрощенной модели такого типа был рассмотрен в работе Гринина и Мицкевича [18]. В ней были рассчитаны профили бальмеровских линий, образующихся в сферически симметричной оболочке звезды типа T Тау с дискретной структурой звездного ветра.

В настоящей работе были также использованы упрощенные модели. В их основе была взята звезда класса A0 V, окруженная изотермической оболочкой с $T_e = 10^4$ К дискообразной формы. Законы изменения скоростей расширения и вращения, а также распределение плотности атомов водорода задавались набором входных параметров. Для построения теоретических профилей были использованы методика и программа расчета, подробно описанные в работах автора [14, 15]. Во всех вариантах профиль коэффициента поглощения водорода предполагался доплеровским без учета турбулентного уширения.

В качестве исходного, «невозмущенного» профиля был рассчитан профиль типа P Cug II, наиболее хорошо соответствующий наблюдаемым профилям в спектрах A_α -звезд Хербига.

3. Профили линий в оболочке с зоной твердотельного вращения. Среди звезд с оболочками и, в частности, среди звезд Хербига часто встречаются объекты с профилями бальмеровских линий, как бы промежуточными между P Cug и двойными, когда имеются два эмиссионных пика различной интенсивности, причем более интенсивным является красный пик. Расчеты показывают, что такие профили будет иметь звезда с оболочкой, в которой наряду с расширением присутствует и сильное вращение [14]. Напрашивается естественное предположение, не может ли обсуждаемое в настоящей работе превращение II типа P Cug-профиля в III тип быть результатом увеличения относительной роли вращения в общей кинематике расширяющейся оболочки. Если бы это происходило за счет ослабления радиального компонента, то линия становилась бы уже, а наблюдается скорее обратное явление: на фазах появления вторичного максимума линия или несколько уширяется, или ее ширина не меняется. Значит в оболочке должны происходить процессы, приводящие к эффек-

тивному увеличению ее вращения. Подобные явления могут иметь причину, связанную с существованием звездного магнетизма.

В 1980 г. Михалас и Конти [16] предложили для объяснения переменности Р Суг-профилей линий качественную модель вращающейся звезды с магнитосферой, которая и была положена в основу настоящих расчетов.

Была рассмотрена звезда А0 V с дисковой вращающейся и расширяющейся оболочкой. Если звезда магнитоактивна и имеет магнитосферу радиуса r_A , определяемого из условия, что на границе плотности магнитной и кинетической энергии вращения равны, то часть оболочки внутри магнитосферы будет твердотельно вращаться вместе со звездой, а при $r > r_A$ — по закону сохранения момента вращения $v_{\text{вр}} \sim r^{-1}$. Для скорости расширения был принят закон, согласно которому истечение происходит с ускорением ($v_p \sim r^\alpha$) до некоторого расстояния r_M , а потом начинает замедляться ($v_p \sim r^\beta$). Результаты расчетов показали, что выбор значений α и β в разумных пределах не сильно влияет на вид профиля. Нами были использованы величины $\alpha = \beta = 1/2$. Предварительно было исследовано влияние различных свободных параметров на вид рассчитанных профилей. Так, например, на рис. 2а иллюстрируется зависимость профиля H_α от величины r_M .

На рис. 2b показаны профили для различных значений радиуса магнитосферы r_A . Оказалось, что путем подбора начальных данных для плотности N_0 и скорости расширения $v_p(R_*)$, можно построить семейство теоретических профилей, достаточно хорошо отражающее изменения наблюдаемого профиля H_α у Ас-звезд Хербита. К их характерным особенностям следует отнести примерное сохранение уровня максимальной интенсивности и небольшое увеличение красного крыла профиля при переходе от II типа Р Суг-профиля к III типу. При этих расчетах параметры $v_{\text{вр}}(R_*)$, r_M и толщина диска оболочки d имели фиксированные значения.

N_0	r_A/R_*	$v_p(R_*)$	N_0	$B(R_*)$
—	—	км/с	10^{11} см^{-3}	Гс
1	1	80	3.0	0
2	3	70	3.4	180
3	4	30	4.0	280

Как видно из следующей таблицы увеличение радиуса магнитосферы, соответствующее росту магнитной активности звезды, сопровождается

увеличением плотности и уменьшением скорости истечения вещества. Именно такая картина наблюдается на Солнце, когда во время активной фазы преобладают замкнутые конфигурации магнитного поля, затрудняющие отток ионизованного газа от звезды.

4. Влияние струи с твердотельным вращением на профили линий. В предыдущем разделе были рассмотрены модели замагниченной оболочки для магнитного поля B , зависящего только от расстояния до звезды r . При этом эффекты неоднородностей в распределении поля по поверхности звезды не учитывались. Между тем, как уже отмечалось выше, результаты наблюдений свидетельствуют о существовании у A -звезд Херbiga локальных магнитных полей, влияющих на характер истечения вещества в оболочку, которые являются причиной возникновения в ней струйной структуры.

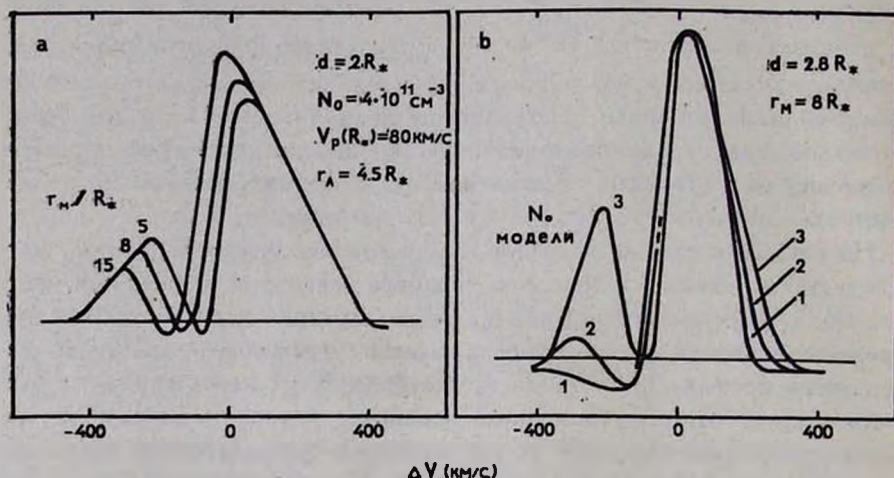


Рис. 2. Модели дисковой осесимметричной оболочки с магнитосферой радиуса r_A и толщиной диска d . Скорость вращения $v_{\text{вр}} \sim r$ при $r < r_A$ и $v_{\text{вр}} \sim r^{-1}$ при $r > r_A$. Начальная скорость вращения $v_{\text{вр}}(R_*) = 80 \text{ км/с}$. Остальные обозначения приведены в тексте.

а) Зависимость профиля H_α от величины r_A . Остальные параметры модели постоянны.

б) Семейство профилей H_α для разных значений r_A при фиксированных значениях максимальной интенсивности в эмиссии и ширины Р Суг — профиля с голубого конца. В таблице приводятся начальные значения плотности и скорости расширения в оболочке, а также оценки магнитного поля на поверхности звезды при $B(r) \sim r^{-2}$.

В настоящем разделе рассмотрена группа моделей с отдельной струей, связанной с локальной магнитной областью. В них, в отличие от мо-

делей, обсуждаемых в предыдущем разделе, зона твердотельного вращения, ограниченная альвеновским радиусом ($r < r_A$), существовала только в самой струе. В остальной части оболочки поле скоростей вращения на всех расстояниях определялось законом сохранения момента вращения ($v_{\text{вр}} \sim r^{-1}$). Этот же закон выполнялся и для внешней части струи на расстояниях $r > r_A$.

Были рассчитаны профили линии H_α для различной ориентации струи относительно наблюдателя, которые позволяют сделать прогноз ожидаемым изменениям профилей в зависимости от фазы периода вращения звезды с оболочкой. Форма струи, ее параметры и положение в оболочке, а также относительно наблюдателя показаны на рис. 3. Для простоты расчетов было принято, что струя распространяется в экваториальной части вращающейся и одновременно расширяющейся оболочки, сохраняя при этом толщину d_s , равную везде в расчетах одной четверти толщины диска всей оболочки d . В любом сечении, перпендикулярном плоскости диска, струя считалась прямоугольной. Как показала проверка, эффекты «закругленности» краев, особенно существенные у основания струи, практически не влияют на вид профиля. Форма струи определялась, исходя из конкретной принятой кинематики. Закон истечения вещества был принят таким же, как и в предыдущем параграфе с $r_M = 8R^*$. Были использованы значения начальной плотности $N_0 = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ для струи и $N_0 = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ для остальной части оболочки. Считалось также, что струя существует в оболочке до расстояния r_B , а далее полностью диссипирует.

На рис. 4 показано, какие искажения поля лучевых скоростей оболочки $V_z(r)$ вносит струя при ее различных положениях относительно наблюдателя, а на рис. 5 приводятся теоретические профили линии H

для 16 таких положений с углом истечения $\varphi_k = \frac{\pi}{8} (k-1)$, $k = 1, \dots, 16$ (см. рис. 3).

Как видно на рисунке, наблюдаются различные виды P Cyg-профиля III типа, изменяющиеся в фазой вращения струи в определенной последовательности. При $k = 1, 2, 3, 4$ главной причиной возникновения вторичного максимума является появление новых областей с большими отрицательными V_z . При $k = 5, 6, 7, 8$ — увеличение плотности в постоянно существующих зонах с высокими отрицательными V_z . На фазах, когда $k = 9 \div 15$, тип профиля пропадает, но возникает эмиссионный пик уже в красном крыле линии.

Такая последовательность изменения профиля может быть выявлена при исследовании быстрой спектральной переменности отдельных объек-

В реальных оболочках существуют, по-видимому, одновременно несколько струй, появляющихся в различных местах. При этом возникно-

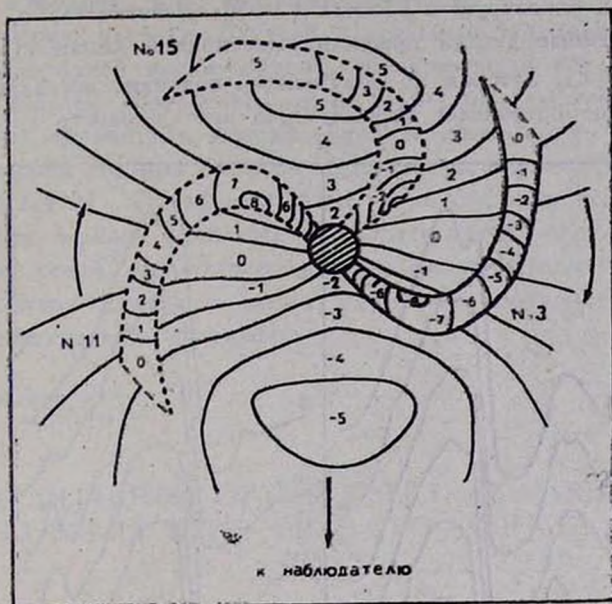


Рис. 4. Влияние струи на поле лучевых скоростей в оболочке для ее некоторых положений относительно наблюдателя. Обозначены номера положений струи k , а также направление вращения оболочки. Области с различными лучевыми скоростями отмечены номером l , где лучевая скорость V_z км/с находится в пределах: $50 (l-1) < V_z < 50l$.

вление эмиссионных пиков в области красного крыла будет проявляться просто как его уширение. Как показывают данные наблюдений, усиление вторичного эмиссионного максимума у профиля H_α в среднем сопровождается ростом эмиссии в красном крыле линии. Поскольку для отдельных струй голубой и красный пики образуются на разных фазах периода вращения, то особый интерес должно иметь исследование, направленное на обнаружение антикорреляции в изменениях этих компонентов профиля. В предельном варианте, когда число струй в оболочке становится достаточно велико, будет иметь место случай, описываемый моделями с однородной магнитосферой, которые обсуждались в предыдущем разделе.

5. **Заключение.** В настоящей работе были рассмотрены два типа моделей околозвездной оболочки, которые могут объяснить наблюдаемую спектральную переменность в Ас-звездах Хербига с РСуг-профилями

бальмеровских линий. Оба типа связаны с существованием у этих звезд магнитных полей. Хотя все результаты получены с использованием упрощенных изотермических моделей, они могут быть перенесены и на модель с хромосферой, описанную в работах [5—9]. Действительно, все рассмотренные переменные детали профиля эмиссионной линии H_α образуются в области $r \geq r_A$, которая по полученным оценкам составляет $3 \div 4 R_*$, что существенно превышает эффективную протяженность хромосферы.

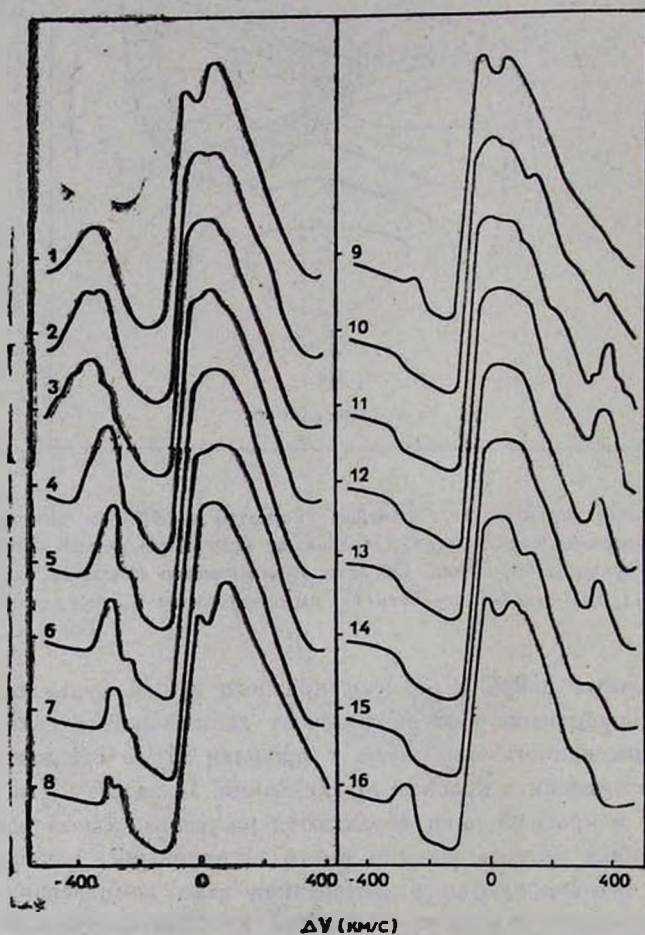


Рис. 5. Профили линии H_α для модели с вращающейся струей при ее различной ориентации относительно наблюдателя (φ_k , $k = 1, \dots, 16$).

Основным способом проверки предлагаемых моделей является получение длинных рядов наблюдений отдельных объектов, позволяющих выявить реальный ход изменений в широком диапазоне характерных вре-

мен. Важно также проведение поляризметрических измерений, которые позволяют независимым способом обнаруживать и исследовать как неоднородности в оболочке, так и звездный магнетизм.

По-видимому, наиболее близкой к реальным условиям была бы модель с неоднородной магнитосферой, объединяющая оба рассмотренных здесь типа моделей. Безусловно, она включала бы слишком большое число свободных параметров, описывающих ее особенности, для однозначного определения которых было бы недостаточно только данных об изменениях профиля H_α. Подобная модель могла бы быть использована для интерпретации полного комплекса наблюдательных данных, включая параметры всех линий, наблюдаемых в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра, а также особенности поляризации излучения в широком спектральном диапазоне.

Главная астрономическая
обсерватория АН СССР

SOME PECULIARITIES OF THE SPECTRAL VARIABILITY OF A_e HERBIG STARS WITH THE P CYG PROFILES OF BALMER LINES

M. A. POGODIN

Two types of models of the circumstellar envelope of an A0V star are considered. They explain the observed variability of H_α profiles of A_e Herbig stars. One of the types suggests the existence of the magnetosphere with solid body rotation in the disc rotating and expanding envelope. The other type suggests propagation of high density stream through that envelope. Both models are based on the assumption that Herbig stars have magnetic fields.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. H. Herbig, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 4, 337, 1960.
2. U. Finkenzeller, R. Mundt, *Astron. and. Astrophys. Suppl. Ser.*, 55, 109, 1984.
3. C. Catala, J. Czarny, P. Felenbok, F. Praderie, *Astron. and. Astrophys.*, 154, 103, 1986.
4. C. S. Beals, *Publ. Dom. Astrophys. Obserw.*, 9, 1, 1951.
5. C. Catala, P. B. Kunasz, F. Praderie, *Astron. and. Astrophys.*, 134, 402, 1984.
6. C. Catala, A. Talavera, *Astron. and. Astrophys.*, 140, 421, 1984.
7. C. Catala, P. B. Kunasz, *Astron. and. Astrophys.*, 174, 158, 1987.
8. C. Catala, *Astron. and. Astrophys.*, 193, 222, 1988.
9. P. Felenbok, J. Czarny, C. Catala, F. Praderie, *Astron. and. Astrophys.*, 201, 247, 1988.

10. F. Praderie, T. Simon, C. Catala, A. M. Boesgaard, *Astrophys. J.*, 313, 311, 1986.
11. C. Catala, F. Praderie, J. Czarny, *Astrophys. J.*, 308, 791, 1985.
12. C. Catala, F. Praderie, P. Felenbok, *Astron. and Astrophys.*, 182, 115, 1987.
13. D. I. Mullan, *Astrophys. J.*, 283, 303, 1984.
14. М. А. Погдин, *Астрофизика*, 24, 491, 1986.
15. М. А. Погдин, *Астрофизика*, 31, 153, 1989.
16. D. Mihalas, P. S. Conti, *Astrophys. J.*, 235, 515, 1980.
17. L. M. Garrison, C. Anderson, *Astrophys. J.*, 218, 438, 1977.
18. V. P. Grinin, A. S. Milskevich, in "Flare Stars in Star Clusters, Associations and Solar Vicinity", IAU Sump. № 137, Reidel, Dordrecht, 1990.