

УДК 524.31.02-36

Анализ химического состава бариевых звезд

Ю.В. Пахомов¹, Л.И. Антипова¹, А.А. Боярчук¹, М.В. Юшкин², Д.В. Бизяев³

¹ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

² Специальная астрофизическая обсерватория, Н.Архыз, Россия

³ Государственный астрономический институт им.Штернберга, МГУ, Москва, Россия

Поступила в редакцию 19 декабря 2005 года

Аннотация. Представлены результаты анализа содержаний химических элементов в атмосферах бариевых звезд, полученные методом моделей атмосфер на основе спектров с высоким разрешением. Выполнено сравнение полученных данных по химическому составу для звезд различных подгрупп: красных гигантов, умеренных и классических бариевых звезд. Сделан вывод, что умеренные и классические бариевые звезды являются разными по природе объектами: умеренные бариевые представляют собой одиночные красные гиганты на более поздней стадии эволюции, чем нормальные красные гиганты; классические бариевые - это звезды в двойных системах и происхождение избытков s-элементов связано с проэволюционировавшим компонентом.

ANALYSIS OF BARIUM STARS ABUNDANCES, *by Pakhomov Yu.V., Antipova L.I., Boyarchuk A.A., Yushkin M.V., Bizyaev D.V.* Results of the analysis of abundance of chemical elements in atmospheres of barium stars, obtained by the method of models of atmospheres on the basis of high resolution spectra are presented. Comparison of chemical composition for stars of various subgroups (normal red giants, mild and classical barium stars) is executed. It is drawn a conclusion, that the mild and classical barium stars are different objects by the nature: mild barium are single red giants at later stage of evolution; classical barium are stars in double systems and the origin of overabundance of s-elements is connected with a component of a far evolutionary stage.

Ключевые слова: красные гиганты, бариевые звезды, звездная спектроскопия, химический состав, звездная эволюция

1 Введение

Как известно, большинство звезд гигантов поздних спектральных классов имеют нормальный химический состав, то есть содержания химических элементов в их атмосферах соответствуют солнечным содержаниям. Однако некоторые из них показывают в своих спектрах значительные химические аномалии. К таким звездам относятся, например, CN- и CH-звезды, SrII-звезды, BaII-звезды и другие, представляющие пекулярные группы G-K-гигантов. Большое количество причин, влияющих на химический состав звездных атмосфер, не позволяет классифицировать пекулярные красные гиганты только по одному какому-нибудь параметру или химическому элементу.

Согласно теории звездной эволюции, на этапе ухода звезды с главной последовательности у нее развивается конвективная оболочка, которая, постепенно расширяясь, проникает в глубокие

внутренние слои звезды, в которых на стадии главной последовательности проходили ядерные реакции, и выносит продукты этих реакций в верхние слои звездной атмосферы, что приводит к изменению ее химического состава (Ибен, 1991). Исследование этих изменений в спектрах позволяет изучать процессы, проходящие в недрах звезд. Так, например, хорошо известным наблюдательным фактом является резкое уменьшение содержаний легкогорящих элементов, таких как литий и бериллий, в атмосферах звезд, сошедших с главной последовательности (Датона, 1991; Бозгаард, Бадж, 1989; Гилрой, 1989; Лак, Ламберт, 1982). Кроме того в атмосферах таких звезд наблюдается изменение содержаний углерода, кислорода, азота и их изотопов, что является следствием протекания CNO-цикла горения водорода в звездных недрах (Ламберт, Раез, 1981; Бердюгина, 1993; Дэй и др., 1973; Боярчук и др., 1991; Харрис и др., 1985).

Таким образом, задача исследования содержаний химических элементов в атмосферах красных гигантов различных групп и их сравнительный анализ важны для понимания как звездной эволюции, поскольку отражают синтез элементов в недрах звезды в различные ее фазы, так и для химической эволюции Галактики.

Данная работа представляет исследование одной группы пекулярных красных гигантов – бариевых звезд.

Впервые бариевые звезды (или звезды BaII) были выделены в отдельную группу в работе (Бидельман, Кинэн, 1951). При разработке двумерной спектральной классификации авторы нашли пять звезд G-K гигантов, в спектрах которых резонансная линия BaII ($\lambda 4554\text{\AA}$) имела аномально высокую интенсивность, характерную для звезд класса S. Кроме того в спектрах было найдено усиление линий SrII, а также молекулярных полос CN, CN и C₂, что больше подходит для звезд, принадлежащих асимптотической ветви, а не для G-K гигантов.

В работе (Бербидж, Бербидж, 1957) авторы, выполняя количественный анализ химического состава бариевой звезды HD 46407, предположили, что аномалии в содержаниях элементов тяжелее железной группы имеют происхождение в недрах звезды и выносятся наверх вследствие конвективного перемешивания, а происхождение этих аномалий вызвано скорее всего процессом медленного захвата нейтронов.

Классификация бариевых звезд была предложена в работе (Уорнер, 1965) по “степени бариевости”, то есть по степени интенсивности как линий BaII ($\lambda 4554\text{\AA}$), так и более тяжелых элементов. Она включала в себя пять групп по шкале от 1 (самая слабая пекулярность) до 5 (самая сильная). А в работе (Морган, Кинэн, 1973) была выделена подгруппа “полубариевых”. Позднее (Кинэн, Питтс, 1980) эти звезды стали называться умеренными бариевыми с классификацией их “бариевости” от Ba0 до Ba1.0.

Внимание к этим интересным объектам не ослабевает, их исследования продолжают. Возросло и количество обнаруженных бариевых звезд. В современном списке бариевых звезд (классических и умеренных) (Лу, 1991) их насчитывается около 400. Однако общее число бариевых звезд по отношению к количеству обычных красных гигантов невелико и составляет всего около 0.5-1% (Бидельман, 1985).

2 Наблюдения и обработка

Для исследования бариевых звезд и дальнейшего их сравнительного анализа с нормальными красными гигантами были проведены наблюдения 32 бариевых звезд (из них 12 умеренных и 20 классических) на четырех инструментах: 1) кудэ-спектрографе АСП-14 2.6-м телескопа ЗТШ КрАО (Васильев, 1976) ($R \approx 45.000$); 2) эшелле-спектрографе НЕС2 6-м телескопа БТА САО (Панчук и др., 1999) ($R \approx 60.000$); 3) эшелле-спектрографе СЕ 2.1-м телескопа “Otto Struve”, McDonald ($R \approx 60.000$). В качестве приемников излучения везде использовалась ПЗС-камеры. Уровень сигнала к шуму $S/N > 100$.

Поскольку в указанных наблюдениях регистрировались короткие участки спектров, то для проведения непрерывного спектра мы руководствовались проанализированными ранее регистrogramмами фотографических спектров красных гигантов, полученных на 2.6-м телескопе

ЗТШ КрАО, протяженность которых порядка 1000 \AA , что позволяет уверенно провести на них уровень непрерывного спектра.

Для проверки корректности в сопоставлении данных, полученных на разных телескопах, мы провели сравнение оценок эквивалентных ширин линий в спектре красного гиганта β Gem, измеренных на основании наблюдений на всех используемых инструментах. Между этими наборами измеренных эквивалентных ширин нет систематического сдвига, а разброс отдельных значений невелик - не превышает точности измерений эквивалентных ширин (нескольких миллиангстрем). Поэтому можно заключить, что сравнительный анализ химического состава, выполненный на основании оценок эквивалентных ширин, полученных из наблюдений на этих инструментах, не должен содержать систематических различий.

Большое внимание было уделено отбору спектральных линий для определения содержаний химических элементов. Отбирались чистые (неблендированные) линии, согласно базе данных VALD (Пискунов и др., 1999), для которых существующие значения сил осцилляторов являются достаточно уверенными. Во избежание потери точности определения содержаний химических элементов из-за отсутствия надежных данных о постоянных затухания мы ограничились линиями, эквивалентные ширины которых не превышали 100 m\AA , этим мы также уменьшаем влияние возможных неЛТР-эффектов.

По методике, основанной на анализе содержаний элементов группы железа методом моделей атмосфер Куруца, подробно описанной в (Боярчук и др., 2001), определялись эффективная температура T_{eff} , ускорение силы тяжести $\lg g$ и микротурбулентная скорость V_t . Используя эти данные по программе ATLAS9 (Куруц, 1992) вычислялась модель звездной атмосферы. Содержания химических элементов вычислялись с помощью программы WIDTH9 по измеренным эквивалентным ширинам спектральных линий.

Основные отличия в типичных содержаниях химических элементов относительно Fe в атмосферах красных гигантов от соответствующих солнечных значений наблюдаются у элементов Na, Mg, Al, Si, а также у элементов тяжелее группы железа, которые часто показывают избыток.

3 Анализ содержаний элементов Na, Mg, Al, Si

Известно, что в атмосферах красных гигантов и сверхгигантов содержания этих элементов относительно содержания Fe находятся в избытке. Впервые это было обнаружено для натрия в сверхгигантах (Боярчук, Любимков, 1983) по спектральным наблюдениям, полученным в КрАО. Теоретические расчеты (Боярчук и др., 1988) показали, что избыток $[\text{Na}/\text{Fe}]$ реален и не может быть объяснен эффектами отклонения от ЛТР. А в работе (Денисенков, Иванов, 1987) было дано объяснение, что этот избыток может возникать вследствие горения водорода в NeNa-цикла.

В дальнейшем избыток $[\text{Na}/\text{Fe}]$ был обнаружен и в красных гигантах малых масс (Боярчук и др., 2001), и найдена зависимость этого избытка от ускорения силы тяжести, что является свидетельством развивающейся конвекции, которая выносит из недр продукты ядерных реакций, проходивших на стадии главной последовательности, в атмосферу звезды.

Подобные избытки и зависимости были обнаружены и для алюминия и кремния (Боярчук и др., 2001), а также для магния (Антипова и др., 2004), что является свидетельством протекания не только NeNa, но и MgAl-цикла горения водорода (Кавалло и др., 1996; Кавалло и др., 1998) и действия конвективного перемешивания.

На рис. 1 показаны зависимости содержаний $[\text{Na}/\text{Fe}]$, $[\text{Mg}/\text{Fe}]$, $[\text{Al}/\text{Fe}]$ и $[\text{Si}/\text{Fe}]$ от ускорения силы тяжести для нормальных красных гигантов, умеренных и классических бариевых звезд. Отметим, что исследуемые звезды имеют металличность, несильно отличающуюся от солнечной ($-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.2$), и согласно (Рэдди и др., 2003) химическая эволюция Галактики не будет иметь заметного вклада в содержания Na, Mg, Al, Si относительно Fe. Из рисунков видно, что избытки всех приводимых элементов увеличиваются с уменьшением $\lg g$. Причем для каждого элемента имеется единый характер этих зависимостей для звезд разных подгрупп, что говорит о едином механизме возникновения этих избытков.

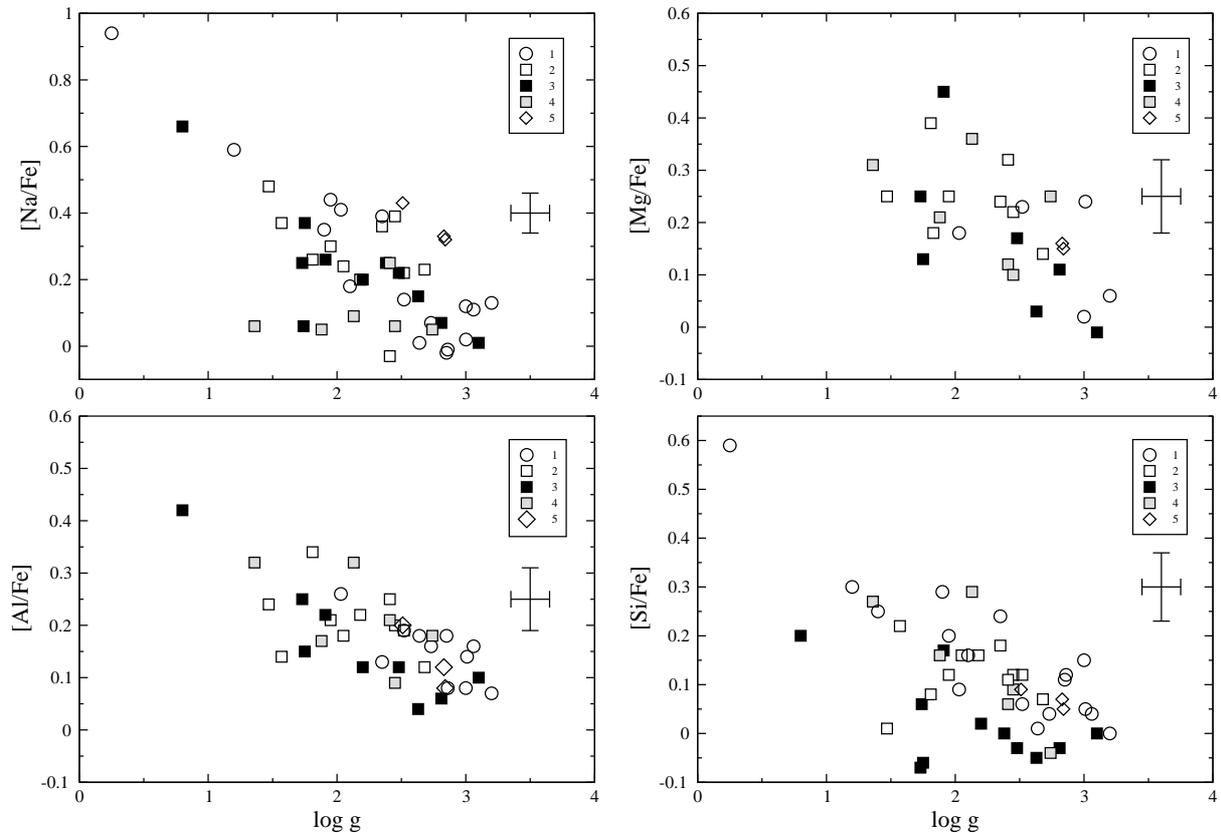


Рис. 1. Зависимость содержаний $[Na, Mg, Al, Si/Fe]$ от ускорения силы тяжести. Обозначения: 1 - нормальные красные гиганты и сверхгиганты, 2 - умеренные бариевые звезды, 3 - классические бариевые звезды с известным периодом, 4 - классические бариевые звезды без известного периода, 5 - гиганты Гиад

4 Элементы s-процесса

Редкоземельные элементы являются основной отличительной чертой в химическом составе бариевых звезд. Избытки в их содержаниях могут превышать 1.5 dex. Основной гипотезой возникновения таких аномалий является сброс оболочки проэволюционировавшей звездой на своего компонента двойной системы (Макклар, 1983; Лу, 1991; Боффин, Зач, 1994). Доказательством этого служит наблюдательная зависимость избытка содержаний s-элементов от периода обращения. Подобная зависимость, подтверждающая эту гипотезу, приведена на рис. 2(а) для наших звезд, у которых были найдены периоды по изменению лучевых скоростей. Здесь под величиной содержания $[s\text{-эл}/Fe]$ понимается среднее значение по содержаниям s-элементов (Sr, Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr, Nd) относительно Fe. Интересным фактом оказалось то, что внутри этой зависимости была найдена другая - от металличности $[Fe/H]$, то есть чем больше металличность, тем меньше избыток $[s\text{-эл}/Fe]$ на рис. 2(а). Возможно по этой причине одна звезда с малым периодом обращения имеет более низкое содержание $[s\text{-эл}/Fe]$, чем должна была бы иметь согласно приведенной зависимости. Две умеренные бариевые звезды с известными периодами не подчиняются этой зависимости и располагаются ниже ее: одна является спектрально-двойной, а другая оптической двойной, и их компоненты еще не проэволюционировали и не сбросили оболочку. То есть источником избытков s-элементов не может быть второй компонент, а скорее всего нейтроны, производимые фотонейтронными реакциями (Харрисон, Эдвардс, 1974). Эта

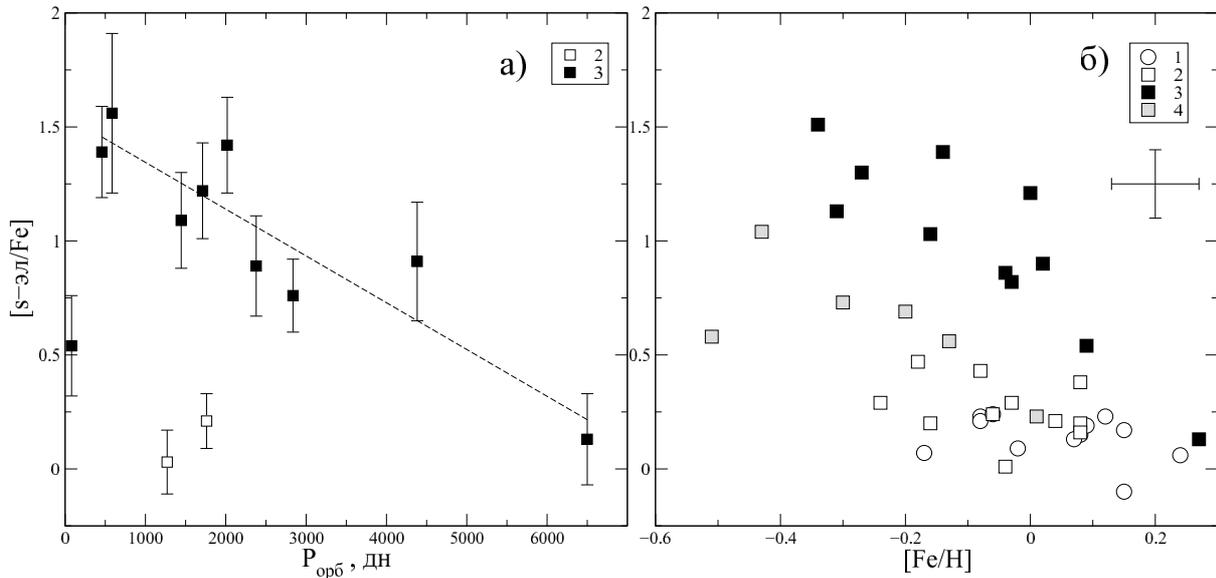


Рис. 2. Зависимость содержания $[s\text{-el}/Fe]$ от периода обращения и от металличности. Обозначения аналогичны рис. 1

гипотеза подтверждается также зависимостью избытков s-элементов от массы звезды и ее фазы эволюции (Антипова, Боярчук, 2001; Боярчук и др., 2002).

На рис. 2(б) показаны положения исследуемых звезд на диаграмме “ $[s\text{-эл}/Fe]$ - $[Fe/H]$ ”. На рисунке видно, что и нормальные красные гиганты имеют небольшие избытки s-элементов, которые по величине сравнимы с избытками в атмосферах умеренных бариевых звезд. Далее в порядке увеличения избытков следуют классические бариевые звезды без известных значений периодов и классические бариевые звезды с определенными периодами. На этом рисунке также имеется внутренняя зависимость от периода обращения в двойной системе, то есть для близких значений металличности выше располагаются звезды с меньшими периодами. И таким образом классические бариевые звезды, у которых не обнаружено изменение лучевых скоростей, скорее всего могут иметь второй компонент на весьма большом расстоянии.

Исходя из анализа содержаний элементов s-процесса, исследуемые звезды разделяются на две группы по происхождению избытков s-элементов. Одна группа – это нормальные красные гиганты и умеренные бариевые звезды, у которых избытки s-элементов вызваны фотонейтронными реакциями и конвективным перемешиванием. Другая группа – классические бариевые звезды, у которых избытки s-элементов имеют происхождение в проэволюционировавшем компоненте двойной системы.

Таким образом, вероятно следует сделать общее заключение, что для объяснения феномена бариевых звезд и избытка в их атмосферах s-элементов необходимо учитывать различные факторы: фазу эволюции, массу, двойственность, металличность. И каждый из этих факторов может вносить больший или меньший вклад.

5 Заключение

Сравнение содержаний химических элементов в атмосферах нормальных красных гигантов, умеренных бариевых звезд и классических бариевых звезд показало следующее:

1. Обнаруженные в атмосферах бариевых звезд избытки содержаний Na, Al, Mg и Si хорошо удовлетворяют зависимости их от ускорения силы тяжести, построенной ранее для нормальных гигантов и сверхгигантов, что свидетельствует о единой природе происхождения этих избытков, независимо от того является ли звезда одиночной или двойной. Эти избытки являются продуктами горения водорода в недрах звезды в NeNa- и MgAl-циклах на стадии главной последовательности, которые выносятся в атмосферу звезды в результате развития конвекции при достижении звездой стадии красных гигантов.
2. Умеренные и классические бариевые звезды – это объекты разной природы:
 - Для получения признаков умеренной бариевой звезды двойственность звезды не является необходимым условием. Подтвержден вывод, что обогащение редкоземельными элементами атмосфер звезд может происходить уже на стадии красных гигантов. Поэтому нормальные красные гиганты и умеренные бариевые звезды представляют собой фактически один класс объектов - одиночные красные гиганты, находящиеся на разных фазах эволюции. Показано, что все они имеют относительно небольшие (до 0.3 dex) избытки содержаний s-элементов в их атмосферах, а их величины зависят в разной степени как от фазы эволюции, так и от металличности и массы объектов. Обнаруженная двойственность некоторых звезд не влияет на величину избытков s-элементов, поскольку в этих случаях компонентами являются нормальные маломассивные звезды, которые не могут быть донорами s-элементов.
 - Для возникновения феномена классической бариевой звезды необходимым условием является наличие двойной звездной системы с компонентами, значительно различающимися по массе, так чтобы скорости эволюции компонентов системы сильно различались. Наиболее массивный из них быстро эволюционирует, достигает фазы асимптотической ветви гигантов и сбрасывает оболочку, “загрязняя” атмосферу спутника веществом с большим содержанием s-элементов.
3. Величина избытка содержаний элементов s-процесса определяется влиянием нескольких параметров: двойственности и периода обращения, массы, металличности и фазы эволюции. В разных объектах любой из них может быть определяющим. Однако, не исключено при этом и заметное влияние других параметров.

Наблюдения ряда звезд получены с ПЗС-матрицей SDS-900 фирмы Photometrics GmbH, установленной на 2.6-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории, благодаря грантам R2Q000 и U1C000 (International Science Foundation, грант A-05-067 ESO C&EE Programm).

Работа выполнена частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-02-17336), Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-162.2003.02), Программы Президиума РАН “Нестационарные явления в астрономии”, ФЦНТП “Астрономия” (раздел 1102) и гранта РФФИ-ГФЕН (код 05-02-39005-ГФЕН_a).

Литература

- Антипова Л. И., Боярчук А. А. // Астрон. журн. 2001 Т. 78 С. 807.
 Антипова Л. И., Боярчук А. А., Пахомов Ю. В., Панчук В. Е. // Астрон. журн. 2004 Т. 81 С. 658.
 Барбидж, Барбидж (Burbidge E. M., Burbidge G. R.) // Astrophys. J. 1957 V. 126 P. 357.
 Бердюгина С. В. // Письма в Астрон. журн. 1993 Т. 19 С. 933.
 Бидельман (Bidelman W. P.) // Cool stars with excesses of heavy elements 1985 P. 43.
 Бидельман, Кинэн (Bidelman W. P., Keenan P. C.) // Astrophys. J. 1951 V. 114 P. 473.
 Бозгаард, Бадж (Boesgaard A. M., Budge K. G.) // Astrophys. J. 1989 V. 338 P. 875.
 Боффин, Зач (Boffin H. M. J., Zacs L.) // Astron. and Astrophys. 1994 V. 291 P. 811.
 Боярчук А. А., Антипова Л. И., Боярчук М. Е., Саванов И. С. // Астрон. журн. 2001 Т. 78 С. 349.
 Боярчук А. А., Губены И., Кубат И., Любимков Л. С., Сахибуллин Н. А. // Астрофизика 1988 Т. 28 С. 343.
 Боярчук А. А., Любимков Л. С. // Изв. КрАО 1983 Т. 66 С. 130.
 Боярчук А. А., Пахомов Ю. В., Антипова Л. И., Боярчук М. Е. // Астрон. журн. 2002 Т. 79 С. 909.

- Боярчук М. Е., Павленко Я. В., Шаврина А. В. // *Астрон. журн.* 1991 Т. 68 С. 291.
- Васильев А. С. // *Известия КрАО* 1976 Т. 55 С. 224.
- Гилрой (Gilroy K. K.) // *Astrophys. J.* 1989 V. 347 P. 835.
- Датона (D'Antona F.) // *The problem of Lithium* 1991.
- Денисенков П. А., Иванов В. В. // *Письма в Астрон. журн.* 1987 Т. 13 С. 520.
- Дэй, Ламберт, Снэден (Day R. W., Lambert D. L., Sneden C.) // *Astrophys. J.* 1973 V. 185 P. 213.
- Ибен (Iben I.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1991 V. 76 P. 55.
- Кавалло, Свэйгард, Бэлл (Cavallo R. M., Sweigart A. V., Bell R. A.) // *Astrophys. J.* 1998 V. 492 P. 575.
- Кавалло, Свэйгард, Бэлл (Cavallo R. M., Sweigart A. V., Bell R. A.) // *Astrophys. J. Letters* 1996 V. 464 P. 79.
- Кинэн, Питтс (Keenan P. C., Pitts R. E.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1980 V. 42 P. 541.
- Куруц (Kurucz R. L.) // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* 1992 V. 23 P. 181.
- Лак, Ламберт (Lack R. E., Lambert D. L.) // *Astrophys. J.* 1982 V. 256 P. 189.
- Ламберт, Раез (Lambert D. L., Ries L. M.) // *Astrophys. J.* 1981 V. 248 P. 228.
- Лу (Lu P. K.) // *Astron. J.* 1991 V. 101 P. 2229.
- Макклар (McClure R. D.) // *Astrophys. J.* 1983 V. 268 P. 264.
- Морган, Кинэн (Morgan W. W., Keenan P. C.) // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* 1973 V. 11 P. 29.
- Панчук В. Е., Клочкова В. Г., Найденов И. Д. // *Препринт САО* 1999 Т. 135.
- Пискунов, Купка, Рябчикова, Стемплис, Вэйсс (Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., Stempels H. C., Weiss W. W.) // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1999 V. 138 P. 119.
- Рэдди, Томкин, Ламберт, Аллэнд Приэто (Reddy B. E., Tomkin J., Lambert D. L., Allende Prieto C.) // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2003 V. 340 P. 304.
- Уорнер (Warner B.) // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 1965 V. 129 P. 263.
- Харрис, Ламберт, Смит (Harris M. J., Lambert D. L., Smith V. V.) // *Astrophys. J.* 1985 V. 292 P. 620.
- Харрисон, Эдвардс (Harrison T. G., Edwards T. W.) // *Astrophys. J.* 1974 V. 187 P. 303.