

УДК 524.31

## Сотрудничество между КраО и обсерваторией Мак Дональд Техасского университета в области звездной спектроскопии

*Л.С. Любимков*

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 15 октября 2008 г.

### Введение

Два эпизода, имевших место в первой половине 20-го века, можно рассматривать как начало сотрудничества в области звездной спектроскопии между Крымской астрофизической обсерваторией (КраО) и обсерваторией Мак Дональд Техасского университета (the McDonald Observatory, McDO). В 1929 г. Григорий Абрамович Шайн, будущий первый директор КраО, и Отто Струве, будущий первый директор McDO, опубликовали фундаментальную работу по вращению звезд (Шайн и Струве, 1929). В ней они дали метод определения скоростей вращения звезд, оценили эти скорости для многих звезд и впервые показали, что горячие звезды классов О и В вращаются значительно быстрее, чем звезды более поздних классов. Позднее, во время визита в США в 1947 г., Г.А. Шайн вместе с О. Струве провел спектральные наблюдения нескольких углеродных звезд на McDO. Полученные результаты были опубликованы в *Astrophysical Journal* (Шайн и Струве, 1947).

В данном кратком обзоре отражено современное сотрудничество между двумя обсерваториями в области звездной спектроскопии, которое продолжается уже 11 лет. Активные наблюдения по первому совместному проекту начались в 1997 г., и в том же году проект выиграл международный грант им. Кретьена Американского астрономического общества. Благодаря этому два участника со стороны КраО – Л.С. Любимков и С.И. Ростопчин – смогли посетить Техасский университет, а затем McDO, где провели наблюдения В-звезд вместе с проф. Д.Л. Ламбертом.

Участниками первого проекта от КраО были Л.С. Любимков, Т.М. Рачковская, С.И. Ростопчин и Д.Б. Поклад, а от Техасского университета – проф. Д.Л. Ламберт (директор McDO с 2003 г.). В 2004 г. С.И. Ростопчин начал работать в McDO в качестве астронома-наблюдателя на крупнейшем телескопе обсерватории НЕТ (см. ниже) и, таким образом, теперь является участником сотрудничества с американской стороны.

### 2 Кратко об обсерватории Мак Дональд

Обсерватория Мак Дональд Техасского университета была открыта в 1939 г. Большую роль в ее создании сыграл Отто Струве, выдающийся астрофизик 20-го века, который родился в 1897 г. в Харькове и закончил Харьковский университет, а с 1921 г. жил и работал в США (подробнее о его жизни и деятельности можно узнать из книги Бальшева, 2008). Обсерватория расположена в западном Техасе вдали от больших городов, в горной местности с сухим климатом. Расстояние от г. Остин (столица штата Техас, где находится университет) составляет по прямой около 600 км.

Интересно сравнить координаты двух обсерваторий:

КрАО: широта = N 44° 43' 39.6"  
долгота = E 34° 00' 52.2"  
высота = 590 м

McDO: широта = N 30° 40' 19.6"  
долгота = W 104° 01' 17.8"  
высота = 2050 м.

Координаты измерены одним и тем же прибором GPS у подножия башен тех телескопов, на которых проводились наблюдения, т. е. 2.6-м в КрАО и 2.7-м на McDO. Видим, что McDO расположена на 14° южнее и на 1460 м выше, чем КрАО. Таким образом, на McDO мы могли наблюдать более южные звезды, чем в КрАО (до  $\delta = -31^\circ$ ).

Перечислим основные телескопы McDO:

**2.1 м** (Otto Struve Telescope)

**2.7 м** (Harlan Smith Telescope)

**10 × 11 м** (Hobby-Eberly Telescope, HET).

Зеркало HET является составным и состоит из 91 шестиугольного зеркала. Оно работает как цельное зеркало диаметром 9.2-м. Наши наблюдения проводились на телескопе 2.7-м с эшелле-спектрометром в фокусе куде. Разрешение составляло  $R = 60000$ . В КрАО наблюдения выполнялись на телескопе 2.6-м (ЗТШ), разрешение спектрографа составляло  $R = 30000$ .

### 3 Первый совместный проект

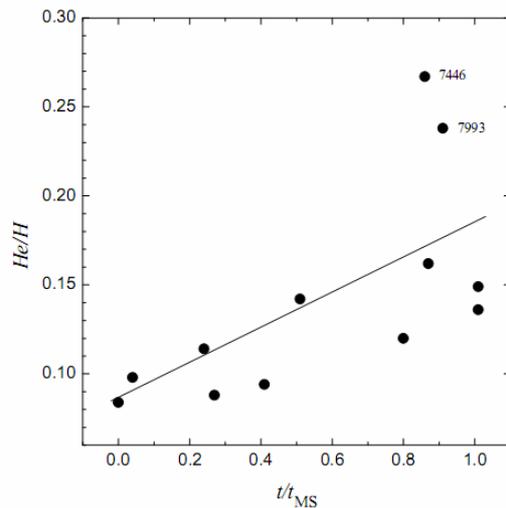
Целью первого совместного проекта было исследование молодых достаточно массивных звезд класса В на стадии главной последовательности (ГП). Спектральные наблюдения 123 звезд ГП от В0 до В5 были проведены на обеих обсерваториях. Основной задачей проекта было определение содержаний элементов CNO-цикла (He, C, N и O) и исследование на основе полученного большого статистического материала эволюционных изменений в этих содержаниях в течение фазы ГП.

Проект по В-звездам в основном завершен. Найдены фундаментальные параметры звезд, в том числе их скорость вращения. Определено содержание элементов CNO-цикла; подтверждено эволюционное увеличение наблюдаемых содержаний гелия и азота на стадии ГП. Показано, что металличность В-звезд в окрестности Солнца совпадает с солнечным значением. Результаты проекта опубликованы в серии статей (Любимков и др., 2000, 2002, 2004, 2005, 2008). На рис. 1–3 представлены некоторые из этих результатов.

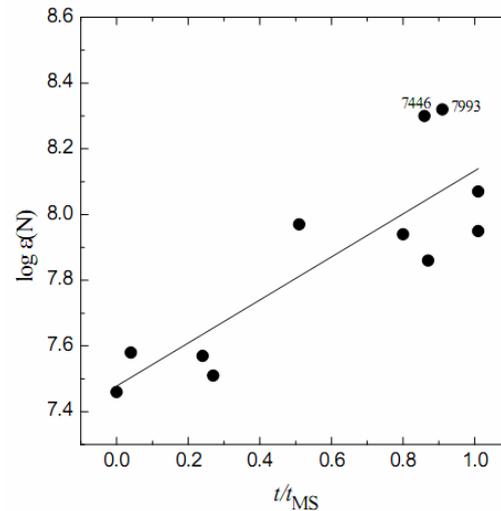
Для 102 В-звезд с массами  $M$  от 4 до 19  $M_\odot$  было найдено содержание гелия  $He/H$  (Любимков и др., 2004). Отметим, что  $He/H$  – это отношение гелия к водороду по числу атомов. Сопоставив величину  $He/H$  с относительным возрастом  $t/t_{ГП}$ , где  $t_{ГП}$  – время жизни звезды данной массы  $M$  на ГП, мы подтвердили, что величина  $He/H$  повышается с возрастом, причем этот эффект наиболее ярко выражен у самых массивных В-звезд. На рис. 1 представлена зависимость  $He/H$  от  $t/t_{ГП}$  для таких звезд, имеющих массы  $M$  от 12 до 19  $M_\odot$ . Видим, что величина  $He/H$  с возрастом повышается, в результате чего к концу стадии ГП в атмосферах таких звезд накапливается заметный избыток гелия. Для двух гигантов вблизи окончания фазы ГП, HR 7446 и HR 7993, которые имеют высокие скорости вращения, получен избыток примерно в 2.5 раза (проекция скорости вращения на луч зрения для этих звезд составляет  $v \sin i = 270$  и 224 км/с соответственно).

Одновременно с повышением  $He/H$  в атмосферах ранних В-звезд происходит увеличение содержания азота  $\log \epsilon(N)$  (последнее дается в обычной логарифмической шкале, где для водорода принято  $\log \epsilon(H) = 12.00$ ). И снова этот эффект наиболее ярко выражен для самых массивных В-звезд. На рис. 2 представлена зависимость  $\log \epsilon(N)$  от относительного возраста  $t/t_{ГП}$  для звезд той же группы с  $M = 12 - 19 M_\odot$  (Любимков и др., 2008). Прямая линия,

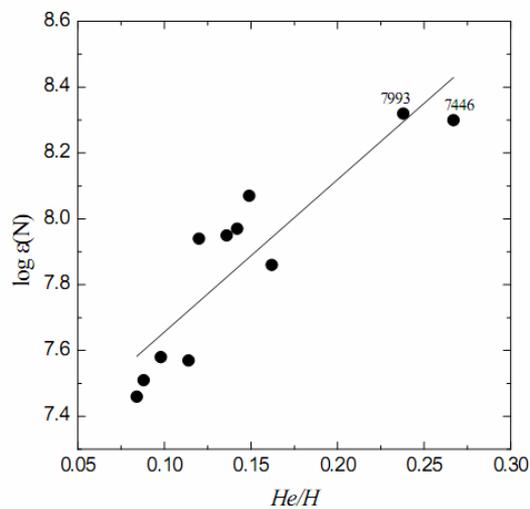
проведенная методом наименьших квадратов, показывает, что содержание азота увеличивается в среднем на 0.65 dex (в 4.5 раза). Из сравнения с теорией следует, что для такого обогащения азотом требуется скорость вращения на экваторе около 300 км/с, что хорошо согласуется с оценкой, полученной по гелию.



**Рис. 1.** Зависимость содержания гелия от относительного возраста для ранних В-звезд с массами  $M = 12-19 M_{\odot}$ .



**Рис. 2.** Зависимость содержания азота от относительного возраста для В-звезд с массами  $M = 12-19 M_{\odot}$ .



**Рис. 3.** Корреляция между содержаниями гелия и азота для В-звезд с массами  $M = 12-19 M_{\odot}$ .

Рис. 1 согласуется с предсказаниями теории, согласно которым избыток гелия в поверхностных слоях звезды в конце стадии ГП тем выше, чем больше ее масса и скорость вращения. Вращение приводит к перемешиванию, в результате которого продукты CNO-цикла выносятся из недр звезды на ее поверхность. Сравнение с расчетами звездных моделей (Хегер и Лангер, 2000) показывает, что представленное на рис. 1 повышение наблюдаемого содержания гелия  $He/H$  достигается при скоростях вращения на экваторе  $v = 300-400$  км/с.

Как и следовало ожидать, существует корреляция между содержаниями гелия и азота. Это хорошо видно из рис. 3, построенного для В-звезд той же группы (Любимков и др., 2008). Для проэволюционировавших гигантов HR 7446 и HR 7993, имеющих высокие скорости вращения, как избыток гелия, так и избыток азота оказались самыми большими.

#### 4 Второй совместный проект

Как следует из теории звездной эволюции, после завершения стадии ГП ранние В-звезды с массами  $M = 4\text{--}19 M_{\odot}$  становятся сверхгигантами классов А, F и G. Согласно расчетам эволюционных моделей звезд с вращением (Хегер и Лангер, 2000), перемешивание на стадии ГП должно влиять на наблюдаемый химический состав звезд с  $M = 4\text{--}19 M_{\odot}$  не только на самой этой стадии, но и на всех последующих стадиях эволюции, включая и фазу А-, F- и G-сверхгигантов.

Наш второй совместный проект естественным образом следовал из первого. Была поставлена задача исследовать большую группу А-, F- и G-сверхгигантов и проанализировать их химический состав. На МсДО были проведены спектральные наблюдения 90 сверхгигантов классов от В8 до G5. В настоящее время исследуются сверхгиганты классов F и G (более 50 звезд). Основная цель – анализ содержания тех элементов, для которых можно ожидать эволюционных изменений, т. е. С, N, O, Na и Li.

Следует отметить, что сверхгиганты класса F активно изучались в КрАО в 1980-х годах. Были получены результаты, которые являются актуальными и в настоящее время. Прежде всего, был обнаружен избыток натрия, который, как оказалось, является общим свойством F- и G-сверхгигантов. Более того, была обнаружена зависимость избытка Na от  $\log g$ , которая является следствием зависимости от массы  $M$  (Боярчук и Любимков, 1983; см. также Любимков, 1994, 1995). В качестве возможного источника Na был предложен синтез этого элемента в NeNa-цикле, который идет в ядре звезды параллельно с CNO-циклом (впоследствии это предположение подтвердилось). Таким образом, наряду с С, N и O был обнаружен еще один ключевой химический элемент – натрий, наблюдаемое содержание которого отражает эволюцию звезды. Далее было показано, что в образовании линий Fe I у F-сверхгигантов значительную роль играют отклонения от локального термодинамического равновесия (ЛТР). Этот эффект может существенно сказаться на определении содержания железа и параметра микротурбулентности  $V_t$  (Боярчук и др., 1985). Было также найдено, что параметр  $V_t$  в атмосферах F-сверхгигантов растет с высотой, что нужно учитывать в анализе достаточно сильных линий (Любимков и Самедов, 1990). Все эти результаты принимаются во внимание при выполнении обсуждаемого проекта.

Первой задачей, предшествующей анализу химического состава, является определение двух фундаментальных параметров, а именно: эффективной температуры звезды  $T_{eff}$  и ускорения силы тяжести в ее атмосфере  $\log g$ . Просмотр литературных данных показал, что разброс в опубликованных значениях  $T_{eff}$  даже для ярких F- и G-сверхгигантов достигает 700 К, а в значениях  $\log g$  – 1.0 dex и более. Это слишком низкая точность для надежного определения интересующих нас содержаний.

Мы резко повысили точность определения параметра  $\log g$ , применив новую редукцию параллаксов *Hipparcos* (Ван Лееуен, 2007). В качестве индикаторов  $T_{eff}$  мы применили фотометрические индексы  $Q$ ,  $[c_I]$  и  $\beta$ ; теоретические значения этих индексов были взяты из последних расчетов Кастелли и Куруца (2003, 2006). Детальное описание нашей методики определения параметров  $T_{eff}$  и  $\log g$  можно найти в работе Любимкова и др. (2009). Некоторые примеры представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 приведена диаграмма  $T_{eff} - \log g$  для сверхгиганта  $\pi$  Sgr (F2 II). Кривые, соответствующие бальмеровским линиям  $H_{\beta}$  и  $H_{\gamma}$  и индексу  $\beta$ , служат индикаторами температуры  $T_{eff}$ , в то время как кривые индексов  $Q$  и  $[c_I]$  задают величину  $\log g$ . Отметим, что все эти кривые являются геометрическим местом точек, где наблюдаемое значение соответствующей величины (например,  $Q$ ) совпадает с теоретическими значениями, вычисленными на основе моделей атмосфер. Линия, соответствующая параллаксу  $\pi$ , дает совершенно независимую оценку  $\log g$ , не связанную с моделями атмосфер. Все перечисленные кривые, включая линию параллакса  $\pi$ , пересекаются на диаграмме в компактной области, которая дает

для звезды  $\pi$  Sgr следующие параметры:  $T_{eff} = 6590 \pm 50$  К и  $\log g = 2.21 \pm 0.05$ . Подчеркнем, что величину  $\log g$  мы определяли исключительно по параллаксу. Надежность нашей оценки параметра  $T_{eff}$  подтверждается тем, что практически то же самое значение  $T_{eff}$  было получено методом инфракрасных потоков, сокращенно IRFM (Рамирес и Мелендес, 2005); этому высокоточному значению соответствует вертикальная штриховая прямая на рис. 4.

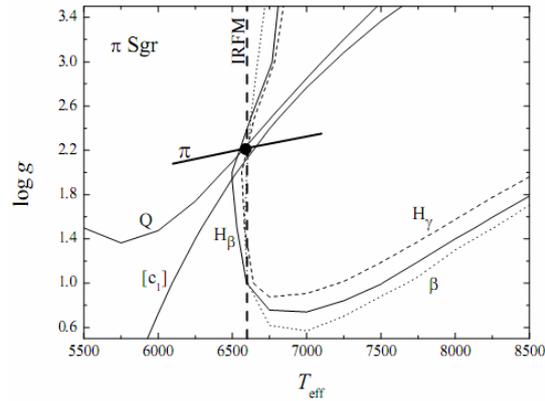


Рис. 4. Диаграмма для определения параметров  $T_{eff}$  и  $\log g$  сверхгиганта  $\pi$  Sgr (F2 II)

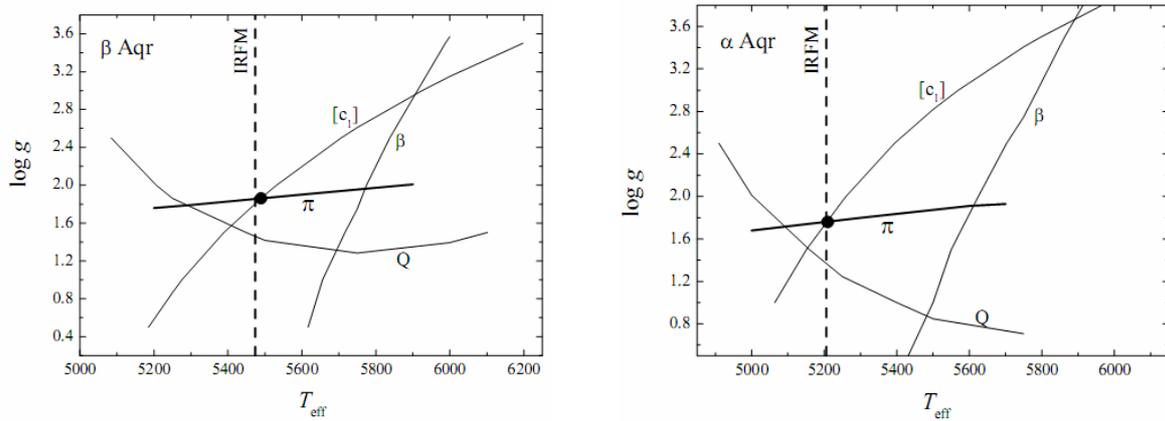


Рис. 5. Диаграмма для определения параметров  $T_{eff}$  и  $\log g$  сверхгигантов  $\beta$  Aqr (G0 Ib) и  $\alpha$  Aqr (G2 Ib)

На рис. 5 приведены диаграммы  $T_{eff} - \log g$  для двух G-сверхгигантов:  $\beta$  Aqr (G0 Ib) и  $\alpha$  Aqr (G2 Ib). Вследствие более низкой эффективной температуры  $T_{eff}$  вид этих диаграмм отличается от того, что получилось в случае F-сверхгиганта  $\pi$  Sgr (рис. 4). Здесь бальмеровские линии  $H_\beta$  и  $H_\gamma$  не поддаются надежному измерению из-за блендирования, и индикаторами  $T_{eff}$  служат индексы  $[c_I]$  и  $\beta$ . Примечательно, что кривые  $[c_I]$  и  $\beta$ , пересекаясь с линией параллакса  $\pi$ , показывают существенно различающиеся значения  $T_{eff}$ . Вертикальные штриховые прямые соответствуют высокоточным значениям  $T_{eff}$ , полученным с помощью IRFM (Блеквелл и Линас-Грей, 1998). Они со всей определенностью указывают на то, что  $T_{eff}$  следует находить по индексу  $[c_I]$ . Точки пересечения линий  $[c_I]$  и  $\pi$  дали нам следующие оценки:  $T_{eff} = 5490 \pm 100$  К и  $\log g = 1.86 \pm 0.05$  для  $\beta$  Aqr и  $T_{eff} = 5210 \pm 100$  К и  $\log g = 1.76 \pm 0.04$  для  $\alpha$  Aqr.

Описанная методика применяется для определения параметров  $T_{eff}$  и  $\log g$  для всех F- и G-сверхгигантов нашего списка. На основе этих значений для каждой звезды вычисляется

соответствующая модель атмосферы, при этом используется программа ATLAS9 Куруца (1993). Основываясь на таких моделях, мы определяем по линиям Fe II параметр микротурбулентности  $V_t$  (линии Fe II, в отличие от линий Fe I, нечувствительны к отклонениям от ЛТР). Одновременно находится содержание железа, которое служит индикатором металличности звезды. Кроме того, параметры  $T_{eff}$  и  $\log g$  позволяют определить массу звезды  $M$  и ее возраст  $t$  (из расчетов эволюционных моделей звезд разных масс). И, наконец, основываясь на вычисленных моделях атмосфер и параметре микротурбулентности  $V_t$ , мы находим содержания интересующих нас элементов.

## 5 Заключение

Сотрудничество между двумя обсерваториями, КрАО и McDO, оказалось плодотворным и выгодным для обеих сторон. Оно успешно продолжается. Ближайшей задачей является завершение определений  $T_{eff}$  и  $\log g$  для всех F- и G-сверхгигантов нашего списка (более 50 звезд). Кроме  $T_{eff}$  и  $\log g$  мы планируем найти для этих звезд еще ряд важных параметров, а именно: параметр микротурбулентности  $V_t$ , содержание железа (или параметр металличности [Fe/H]), массу  $M$ , возраст  $t$ , расстояние  $d$  и скорость вращения  $v \sin i$  (точнее, проекцию скорости вращения на луч зрения). В результате будет получена интересная информация о большой группе F- и G-сверхгигантов в окрестности Солнца (отметим, что подавляющее большинство этих звезд в нашем списке, согласно их параллаксам  $\pi$ , расположено на расстояниях  $d < 600$  пс).

Далее мы оценим для F- и G-сверхгигантов содержания тех химических элементов, которые представляют наибольший интерес с точки зрения звездной эволюции. Один из таких элементов – натрий. Анализ его содержания проводится совместно с Одесским университетом, причем линии Na I анализируются при отказе от условия ЛТР. Первые результаты подтверждают избыток натрия в атмосферах F- и G-сверхгигантов. Не-ЛТР анализ будет применен также при определении содержаний таких элементов как C, N, O и Li. Отметим, что при этом анализируются линии нейтральных атомов C I, N I, O I и Li I.

В нашем списке имеется также около 30 A- и поздних B-сверхгигантов. Для них мы тоже планируем определить все параметры, перечисленные выше, т. е.  $T_{eff}$ ,  $\log g$ ,  $V_t$ , [Fe/H],  $M$ ,  $t$ ,  $d$  и  $v \sin i$ . Линии натрия и лития в спектрах этих относительно горячих звезд уже не видны, кроме, может быть, поздних A-звезд. Поэтому основное внимание будет уделено не-ЛТР анализу содержаний углерода, азота и кислорода. При этом наряду с линиями нейтральных атомов могут рассматриваться и линии ионов C II, N II и O II. Возможно, для ряда поздних B- и ранних A-сверхгигантов удастся определить также содержание гелия по линиям He I.

В заключение следует отметить, что успешному сотрудничеству между КрАО и McDO способствовали неоднократные визиты членов крымской группы в Техасский университет и на McDO, а также посещение профессором Д.Л. Ламбертом КрАО в 2000 г. Подобные визиты оказались бы весьма полезными и в будущем.

## Литература

- Бальшев М.А. // Отто Людвигович Струве. М.: Наука. 2008.  
Блеквелл и Линас-Грей (Blackwell D.E., Lynas-Gray A.E.) // Astron. Astrophys. Suppl. 1998. V. 129. P. 505.  
Боярчук А.А., Любимков Л.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 66. С. 130.  
Боярчук А.А., Любимков Л.С., Сахибуллин Н.А. // Астрофизика. 1985. Т. 22. С. 339.  
Ван Лееувен (van Leeuwen F.) // Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data. Dordrecht: Springer. 2007.  
Ван Лееувен (van Leeuwen F.) // Astron. Astrophys. 2007. V. 474. P. 653.

- Кастелли и Куруц (Castelli F., Kurucz R.L.) // Modeling of Stellar Atmospheres. (IAU Simp. No. 210)/ Eds N.E. Piskunov, W.W. Weiss and D.F. Gray. Poster A20. 2003.
- Кастелли и Куруц (Castelli F., Kurucz R.L.) // Astron. Astrophys. 2006. V. 454. P. 333.
- Куруц (Kurucz R.L.) // CD-ROM 13. ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophys. Obs. 1993.
- Любимков Л.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1994. Т. 91. С. 24.
- Любимков Л.С. // Химический состав звезд: метод и результаты анализа. Одесса: Астропринт. 1995.
- Любимков Л.С., Самедов З.А. // Астрофизика. 1990. Т. 32. С. 49.
- Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Lambert D.L., Rachkovskaya T.M., Rostopchin S.I., Tarasov A.E., Poklad D.B., Larionov V.M., Larionova L.V.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2000. V. 316. P. 19.
- Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Rachkovskaya T.M., Rostopchin S.I., Lambert D.L.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2002. V. 333. P. 9.
- Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Rostopchin S.I., Lambert D.L.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2004. V. 351. P. 745.
- Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Rostopchin S.I., Rachkovskaya T.M., Poklad D.B., Lambert D.L.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2005. V. 358. P. 193.
- Любимков Л.С., Ламберт Д.Л., Ростопчин С.И., Рачковская Т.М., Поклад Д.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. №. 2. С. 217.
- Любимков Л.С., Рачковская Т.М., Поклад Д.Б. // Астрофизика. 2009. (в печати).
- Рамирес и Мелендес (Ramirez I., Melendez J.) // Astrophys. J. 2005. V. 626. P. 446.
- Хегер и Лангер (Heger A., Langer N.) // Astrophys. J. 2000. V. 544. P. 1016.
- Шайн и Струве (Shajn G., Struve O.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1929. V. 89. P. 222.
- Шайн и Струве (Shajn G., Struve O.) // Astrophys. J. 1947. V. 106. P. 86.