

УДК 524.31.02-36

Сравнительный анализ химического состава F-G-карликов и красных гигантов Гиад

Ю.В. Пахомов, Л.И. Антипова, А.А. Боярчук

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 20 октября 2008 г.

Аннотация. Представлены результаты сравнительного анализа содержаний химических элементов в атмосферах F-G-карликов и красных гигантов рассеянного звездного скопления Гиад методом моделей звездных атмосфер. Показано, что избытки [Na/Fe] в атмосферах гигантов Гиад являются следствием конвективного перемешивания при переходе звезды с главной последовательности на ветвь красных гигантов.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION OF F-G-DWARF AND RED GIANTS IN HYADES, *by Yu. V. Pakhomov, L. I. Antipova, A. A. Boyarchuk.*

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

1 Введение

Рассеянное звездное скопление Гиады – это самое близкое к нам скопление звезд, находящееся на расстоянии около 46 пк, и поэтому оно одно из самых изученных скоплений. Оно включает в себя несколько сотен звезд в основном главной последовательности и четыре красных гиганта (Перриман и др., 1998). Возраст скопления оценивается в 625 млн лет, металличность $[Fe/H] = +0.14 \pm 0.05 dex$ (де Бруий и др., 2001). Помимо этого известно также суперскопление (Эгген, 1998) или движущаяся группа звезд, связанная с Гиадами кинематически (Фамей и др., 2005).

Большинство работ, направленных на исследование скопления Гиад, посвящены определению расстояния до него, его возраста, металличности и кинематических свойств. Анализ химического состава не так часто встречается в литературе, авторы в лучшем случае ограничиваются лишь определением металличности или содержания одного или нескольких элементов. Работ по определению содержаний многих элементов еще меньше. Отметим одну из самых первых работ (Конти и др., 1965), в которой автор исследовал карлики Гиад различных спектральных классов и определил методом кривых роста содержания для 18 элементов с ошибкой около 0.2 – 0.3 dex. В последние 20 лет было несколько работ по исследованию химического состава Гиад (Нафтилан, Фэйрчилд, 1993; Бердюгина и др., 1991; Саванов, Боярчук, 1992; Мишенина и др., 1992а; Мишенина и др., 1992б; Лак, Челленер, 1995), в которых число элементов достигало 20, но точность определения содержаний оставалась примерно на том же уровне – около 0.20 dex. В основном причиной тому было несколько технических факторов: низкое спектральное разрешение, использование фотографических пластинок при наблюдениях, а при вычислениях – метода кривых роста, а также

Таблица 1. Список исследованных звезд Гиад

HD	Назв.	RA 2000.0	Dec	m_v	Спектр. класс	T_{eff} К	$\lg g$	V_t км/с	Инстр.
Гиганты Гиад									
19476	κ Per	03:09:29.8	14:51:27.0	3.80	K0III	4923	2.77	1.16	ЗТШ
27371	γ Tau	04:19:47.6	15:37:39.4	3.65	G8III	4956	2.83	1.35	ЗТШ
27697	δ^1 Tau	04:22:56.1	17:32:33.0	3.77	G8III	4980	2.84	1.25	ЗТШ
28305	ϵ Tau	04:28:37.0	19:10:49.5	3.53	K0III	4880	2.51	1.46	ЗТШ
28307	θ^1 Tau	04:28:34.5	15:57:43.8	3.85	K0III	4894	2.74	1.23	Elodie
Карлики Гиад									
26756		04:14:25.6	14:37:30.1	8.42	G5V	5695	4.55	0.90	UVES
27282		04:19:08.0	17:31:29.1	8.43	G8V	5572	4.45	1.00	UVES
28099		04:26:40.1	16:44:48.8	8.10	G2V	5808	4.45	0.86	Elodie
28344		04:28:48.3	17:17:07.7	7.84	G2V	5965	4.35	0.96	UVES
29310		04:37:32.0	15:08:47.2	7.53	G0V	5812	4.29	0.86	Elodie

значений сил осцилляторов небольшой точности. 1990-е годы ознаменовались прорывом в использовании новых высокоэффективных приемников изображения ПЗС-матриц, что дало возможность повысить спектральное разрешение; развитие компьютерной техники позволило проводить вычисления методом моделей атмосфер. Более поздняя работа (Варенн, Мони, 1999) дает более точные результаты ($\Delta\epsilon = 0.10 - 0.15 dex$) в определении содержаний для 11 элементов в атмосферах 48 А-Ф карликов. Примерно в это же время выходит работа (Боярчук и др., 2000), выполненная на основе спектральных наблюдений с помощью кудэ-спектрографа телескопа ЗТШ (КраО), в которой исследовались три красных гиганта Гиад. Качество спектрального материала было достаточно высокое, использование ПЗС-матрицы в сочетании с высокой дисперсией дало спектральное разрешение около 40000 с отношением сигнал/шум > 100 . Применение оригинальной методики, основанной на методе моделей звездных атмосфер и анализе содержаний элементов группы железа, подробно описанной в работе (Боярчук и др., 2001), с использованием уточненных сил осцилляторов позволило весьма точно определить параметры звездных атмосфер (эффективную температуру $\Delta T_{eff} = \pm 70$ К, ускорение силы тяжести $\Delta \lg g = \pm 0.1 dex$, скорость микротурбуленции $\Delta V_t = \pm 0.15$ км/с) и содержания 18 химических элементов с ошибкой около $0.10 dex$. Это показывает очень высокий уровень проводимых работ.

Группа звездной спектроскопии КраО всегда была одной из самых сильных групп на территории бывшего СССР. Этому способствовали и общее астрофизическое направление обсерватории со сформировавшимся научным направлением звездной спектроскопии, и наличие крупного телескопа ЗТШ, оснащенного дисперсионным кудэ-спектрографом (Васильев, 1976) с автоматическим фотогидом для удержания звезды на щели инструмента, и конечно же люди. Это прежде всего А.А. Боярчук, Л.С. Любимков, И.С. Саванов, М.Е. Боярчук. Именно эта группа начала систематические исследования содержаний химических элементов в атмосферах гигантов и сверхгигантов. Пожалуй самым существенным результатом работы этой группы стало обнаружение избытков [Na/Fe] у сверхгигантов (до $1 dex$), о чем речь пойдет дальше.

Интересно было бы выполнить сравнительный анализ химического состава карликов и гигантов Гиад с использованием единой методики определения параметров звездных атмосфер и содержаний химических элементов (Боярчук и др., 2001).

2 Наблюдения и обработка

Итак, данные по трем красным гигантам Гиад представлены из работы (Боярчук и др., 2000). Также среди звезд, исследованных этой группой, есть красный гигант (κ Per), принадлежащий движущейся группе Гиад (Боярчук и др., 2001). Последний гигант θ^1 Tau был исследован в настоящей работе, спектрограммы для этой звезды получены из архивных данных обсерватории Haute-

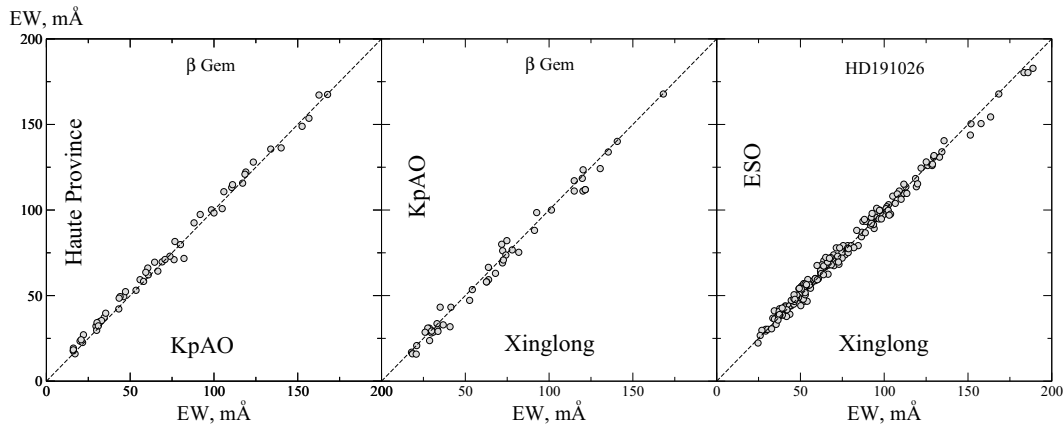


Рис. 1. Сравнение эквивалентных ширин спектральных линий в спектрах звезд β Gem и HD191026, полученных на инструментах различных обсерваторий

Province (телескоп 1.93-м, спектрограф Elodie). Спектры карликов были частично взяты из архивов Elodie и частично из архивов обсерватории ESO (8-м телескоп VLT, спектрограф UVES). Сам список исследуемых карликов был составлен на основе кинематических данных из работы (Перриман и др., 1998) и приведен в табл. 1.

Для спектра каждой звезды проводились уровень континуума, измерения эквивалентных ширин спектральных линий для более 20 химических элементов. По вышеупомянутой методике (Боярчук и др., 2001) определялись T_{eff} , $\lg g$, V_t , далее вычислялась соответствующая модель атмосферы (программа ATLAS9, Куруч, 1992) и содержания химических элементов (программа WIDTH9). Список исследованных звезд с полученными параметрами атмосферы приведен в табл. 1, а содержания химических элементов графически представлены на первых двух частях рис. 2.

Для дальнейшего анализа необходимо выполнить сравнение эквивалентных ширин в спектрах одной звезды, полученных на этих инструментах. Для этой цели мы обычно выбираем нормальный красный гигант β Gem (K0III). На первом рис. 1 представлено сравнение эквивалентных ширин для спектров, полученных в KpAO и Haute-Provence. Спектров этой звезды не нашлось в архивных данных ESO. Поэтому было сделано кросс-сравнение через данные спектрографа 2.16-м телескопа обсерватории Xinglong: β Gem (KpAO-Xinglong) и HD191026 (Xinglong-ESO (programm ID 073.B-0607(A))). На рис. 1 сопоставлены эквивалентные ширины линий в спектрах этих звезд, полученные на разных инструментах. Из него видно, что имеется хорошее согласие между значениями эквивалентных ширин – маленький разброс и отсутствие систематических сдвигов. Поэтому можно уверенно проводить сравнительный анализ химического состава.

3 Анализ содержания натрия

Как известно, при переходе звезды с главной последовательности на ветвь красных гигантов у нее развивается конвективная оболочка, которая, постепенно проникая внутрь звезды, достигает глубоких околоядерных слоев, где химический состав вещества изменен ядерными реакциями. Конвективное перемешивание выносит продукты ядерных реакций в атмосферу звезды, при этом изменяются относительные содержания соответствующих химических элементов.

Звезды Гиад как объекты одного звездного скопления должны иметь один начальный химический состав, поскольку образовались из одного газопылевого облака. При этом если есть различия в содержаниях химических элементов в атмосферах карликов и гигантов, то они должны быть связаны с эволюционными изменениями именно красного гиганта. Разность содержаний элементов в гигантах и карликах Гиад показана на рис. 2, там же указана посередине область возможных

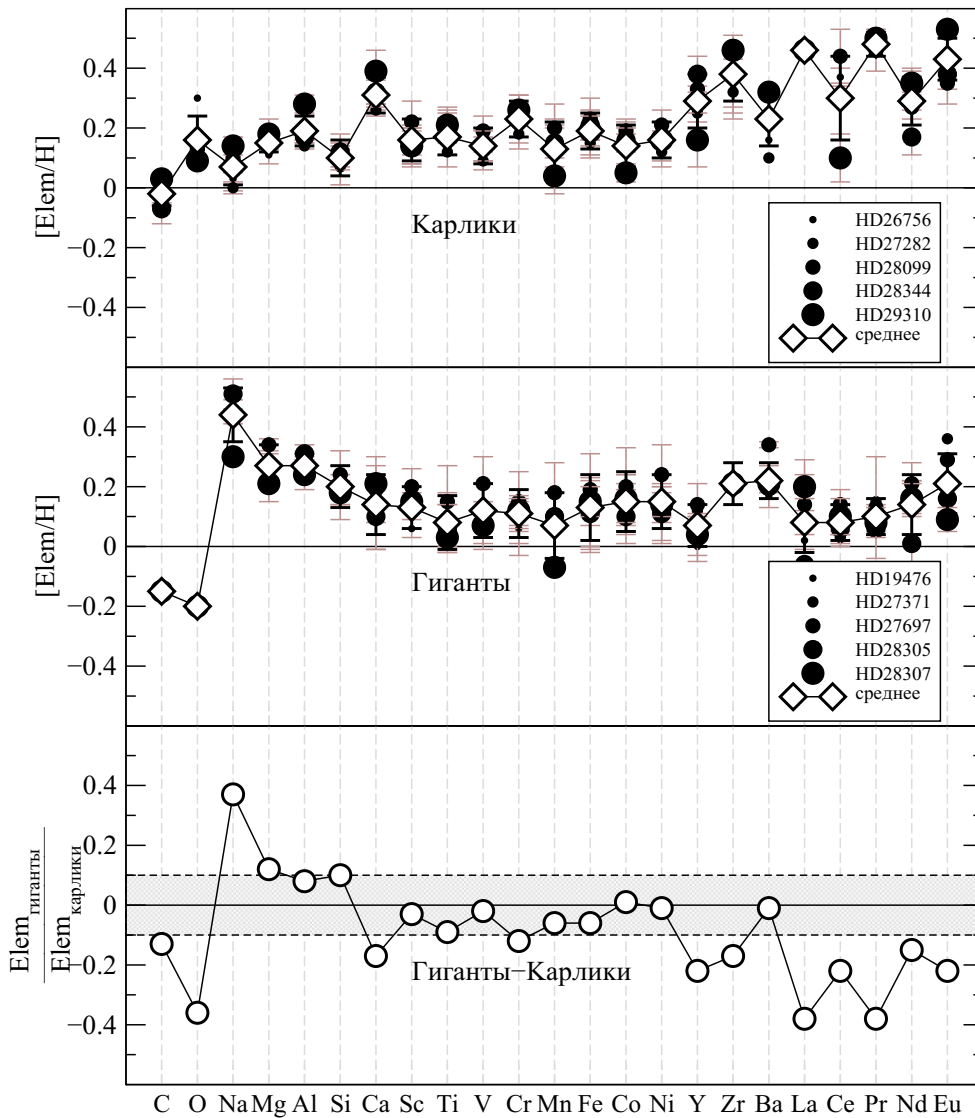


Рис. 2. Относительные содержания химических элементов $[Elem/H]$ в атмосферах карликов и гигантов Гиад. Снизу – содержания химических элементов гигантов Гиад относительно карликов

ошибок. Из рисунка видно, что элементы группы железа имеют одинаковое содержание и в карликах, и в гигантах. Действительно, эти элементы образуются только при вспышках сверхновых и не меняют своего содержания во время эволюции звезды. Легкие же элементы (C, O, Na) существенно различаются в исследуемых звездах. Тяжелые элементы пока не будем рассматривать.

Изменения относительных содержаний C, N, O в атмосферах красных гигантов известны давно и связаны с горением водорода в CNO-цикле. Обнаружение же избытков $[Na/Fe]$ в атмосферах сверхгигантов состоялось только в 1981 году в КраО (Боярчук, Боярчук, 1981; Боярчук, Любимков, 1981; Боярчук, Любимков, 1983), тогда же выявлена зависимость от ускорения силы тяжести $\lg g$ и сделано предположение, что натрий образуется в ядре звезды в неон-натриевой цепочке реакций $^{22}Ne(p, \gamma)^{23}Na$ и может быть вынесен конвекцией из ее глубинных слоев в атмосферу. Расчеты, выполненные в работе (Денисенков, Иванов, 1987; Денисенков, 1988), подтвердили справедливость этой гипотезы.

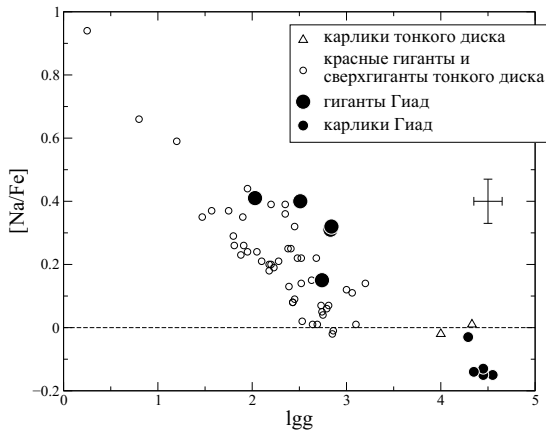


Рис. 3. Зависимость содержания $[Na/Fe]$ в атмосферах звезд Гиад от ускорения силы тяжести $\lg g$.

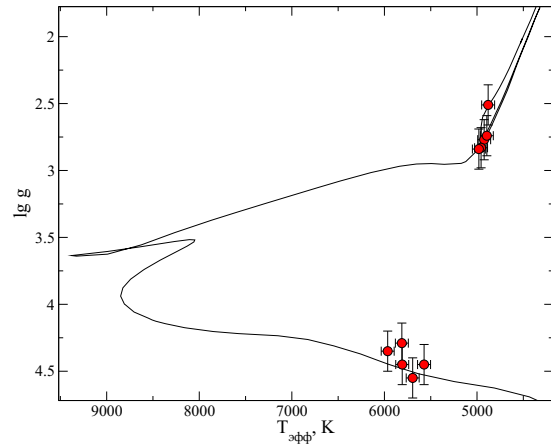


Рис. 4. Положения исследуемых звезд на ГР-диаграмме с изохроной, соответствующей возрасту Гиад

Интересно, что в атмосферах Гиад в работе (Боярчук и др., 2000) также были отмечены избытки содержания $[Na/Fe]$. Причем величина этих избытков весьма существенна и составила $0.30-0.40 dex$, что гораздо больше величины возможных ошибок. Позднее было показано, что в атмосферах нормальных красных гигантов тоже наблюдаются избытки содержания $[Na/Fe]$ и их величины также зависят от ускорения силы тяжести (Боярчук и др., 2001), причем эта зависимость является продолжением отмеченной выше зависимости для сверхгигантов. Избытки содержания $[Na/Fe]$ обнаружены также у умеренных и классических бариевых звезд (Боярчук и др., 2002, Антипова и др., 2004), положения которых удовлетворяют той же зависимости от $\lg g$. Следовательно, явление избытка натрия имеет одну природу в этих объектах – происхождение в реакции $^{22}Ne(p, \gamma) ^{23}Na$ и вынесение в верхние слои звезды конвективным перемешиванием.

В карликах Гиад наблюдается совсем другая картина: содержание $[Na/Fe]$ чуть меньше солнечного значения, около $-0.13 dex$ (рис. 3). То есть содержание натрия в красных гигантах увеличилось почти на $0.5 dex$ (примерно в 3 раза) по сравнению с карликами.

В окрестностях Солнца для звезд-карликов с солнечной металличностью характерно солнечное содержание натрия (Редди и др., 2003) (т. е. $[Na/Fe] = 0$), что также видно из рис. 3, где кроме карликов Гиад приведены два карлика поля. В гигантах избыток $[Na/Fe]$ составляет от 0 до $+0.4 dex$, а в сверхгигантах – до $1 dex$. Следовательно, существует некоторый эволюционный момент, когда в среднем содержание $[Na/Fe]$ становится избыточным. Из рис. 3 видно, что рост избытков начинается около значений $\lg g = 3.0-3.5$. На рис. 3 показана диаграмма “Герцшпрунга-Рассела” в координатах $T_{eff}-\lg g$, где также нанесены положения исследуемых звезд и изохрона, соответствующая возрасту Гиад. Из рисунка видно, что около значений $\lg g = 3.0-3.5$ звезда сходит с главной последовательности и идет в сторону ветви красных гигантов (на данном участке изохрона совпадает с эволюционным треком). Таким образом можно сделать заключение, что избытки натрия действительно появляются при переходе звезды на ветвь красных гигантов вследствие первого глубокого конвективного перемешивания.

4 Заключение

На основании анализа химического состава красных гигантов Гиад в работе (Боярчук и др., 2000) и карликов в настоящей работе, еще раз подтверждается справедливость выводов, сделанных в КРАО в начале 1980-х годов. А именно: натрий образуется в неон-натриевом цикле горения водорода и выносится в атмосферу звезды конвективным перемешиванием на эволюционной стадии перехода

с главной последовательности на ветвь красных гигантов.

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 06-02-16217_a), Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-4354.2008.2), Программы Президиума РАН "Происхождение и эволюция звезд и галактик", гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1992.2008.2 и Фонда содействия отечественной науке.

Литература

- Антипова Л.И., Боярчук А.А., Пахомов Ю.В., Панчук В.Е. // *Астрон. журн.* 2004. Т. 81. С. 658.
- Бердюгина С.В., Боярчук М.Е., Саванов И.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1991. Т. 83. С. 74.
- Боярчук А.А., Боярчук М.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1981. Т. 63. С. 68.
- Боярчук А.А., Антипова Л.И., Боярчук М.Е., Саванов И.С. // *Астрон. журн.* 2000. Т. 77. С. 96.
- Боярчук А.А., Антипова Л.И., Боярчук М.Е., Саванов И.С. // *Астрон. журн.* 2001. Т. 78. С. 349.
- Боярчук А.А., Антипова Л.И., Пахомов Ю.В., Боярчук М.Е. // *Астрон. журн.* 2002. Т. 79. С. 909.
- Боярчук А.А., Любимков Л.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1981. Т. 64. С. 1.
- Боярчук А.А., Любимков Л.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1983. Т. 66. С. 130.
- Варенн О., Мони Р. (Varenne O., Monier R.) // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 351. P. 247.
- Васильев А.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1976. Т. 55. С. 224.
- Де Бруий Ж.Х.Ж. и др. (De Bruijne J.H.J., Hoogerwerf R., de Zeeuw. P.T.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 367. P. 111.
- Денисенков П.А. // *Письма в Астрон. журн.* 1988. Т. 14. С. 1023.
- Денисенков П.А., Иванов В.В. // *Письма в Астрон. журн.* 1987. Т. 13. С. 520.
- Конти П.С. и др. (Conti P.S., Wallerstein G., Wing R.F.) // *Astrophys. J.* 1965. V. 142. P. 999.
- Куруч Р.Л. (Kurucz R.L.) // *Rev. Mex. Astron. Astrof.* 1992. V. 23. P. 181.
- Лак Р.Е., Челленер. С.Л. (Luck R.E., Challener S.L.) // *Astron. J.* 1995. V. 110. P. 2968.
- Мишенина Т.В. и др. (Mishenina T.V., Klochkova. V.G., Ryadchenko. V.P.) // *Astronomical and Astrophysical Transactions* 1992. V. 3. P. 183.
- Мишенина Т.В. и др. (Mishenina T.V., Komarov N.S., Kantsen L.E.) // *Odessa Astronomical Publications.* 1992. V. 6. P. 37.
- Нафтилан С.А., Фэйрчилд К. (Naftilan S. A., Fairchild K.) // *Publ. Astron. Soc. Pac.* 1993. V. 105. P. 565.
- Перриман М.А.К. и др. (Perryman M.A.C., Brown A.G.A., Lebreton Y., Gomez A., Turon C., de Strobel G.C., Mermilliod J.C., Robichon N., Kovalevsky J., Crifo F.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 331. P. 81.
- Редди Б.Е. и др. (Reddy B.E., Tomkin J., Lambert D.L., Allende Prieto C.) // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 2003. V. 340. P. 304.
- Саванов И.С., Боярчук М.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1992. Т. 86. С. 1.
- Фамей Б. и др. (Famaey B., Jorissen A., Luri X., Mayor M., Udry S., Dejonghe H., Turon C.) // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 430. P. 165.
- Эгген О.Д. (Eggen O.J.) // *Astron. J.* 1998. V. 115. P. 2397.