

Изменение магнитного поля CP-звезд с возрастом

Ю.В.Глаголевский¹, Е.Герт²

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

² D-14471 Потсдам, Германия, e-mail: Ewald-Gerth@t-online.de

Поступила в редакцию 23.03.2004; принята к печати 02.06.2004.

С помощью известных данных о средних поверхностных магнитных полях B_s CP-звезд SrCrEu-типа изучено изменение B_s с возрастом. Подтверждены ранние предположения, что среднее поверхностное магнитное поле CP-звезд изменяется обратно пропорционально кубу эволюционно увеличивающегося радиуса, как должно быть в случае дипольной конфигурации поля. В случае существования дополнительных источников диссипации поверхностное поле уменьшалось бы быстрее. Поскольку оценки времени чисто омической диссипации магнитного поля дают величины много больше времени жизни звезд на главной последовательности, то наличие кубической зависимости не противоречит предположению, что полный магнитный поток не изменяется в течение всего времени пребывания звезды на главной последовательности, что магнитное поле уменьшается только вследствие омической диссипации и не существует других источников его разрушения, таких как дифференциальное вращение, меридиональная циркуляция, турбулентция и др. По сравнению со временем жизни на главной последовательности звезд SrCrEu-типа время появления поля вблизи ZAMS очень короткое. Экстраполяция средней зависимости изменения магнитного поля с возрастом на ZAMS дает среднюю величину поля $B_s \approx 18$ kG.

Ключевые слова: химически пекулярные звезды, магнитные поля, вращение

VARIATION OF MAGNETIC FIELD OF CP STARS WITH AGE, by Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth. Using available data on the mean surface B_s magnetic fields of SrCrEu type CP stars, the change of B_s with age has been studied. Earlier assumptions are confirmed that the mean surface magnetic field of CP stars B_s changes in inverse proportion to the cube of evolutionary increasing radius, as it must be in the case of a dipolar field configuration. If additional sources of dissipation existed, the surface field would decrease faster. As time estimations of pure ohmic dissipation of the magnetic field give values much greater than the lifetime of stars on main sequence, the presence of the cubic relation does not conflict with the assumption that the full magnetic flow will not change during whole time the star stays on main sequence, that the magnetic field decreases only owing to ohmic dissipation, and there are no other sources of its destruction such as differential rotation, meridional circulation, turbulence and others. Compared to the lifetime of SrCrEu type stars on the main sequence, the time of appearance of the field near ZAMS (Zero Age Main Sequence) is very short. Extrapolation of the mean relation of magnetic field change with age on ZAMS gives a mean field value of $B_s \approx 18$ kG.

Key words: stars: magnetic fields – stars: chemically peculiar

1. Введение

Изучение поведения магнитных полей у химически пекулярных звезд при их эволюционном движении поперек полосы главной последовательности имеет большое значение для выяснения эволюционных особенностей, в частности условий сохранения магнитных полей и химических анома-

лий со временем. В работе Глаголевского (1988) мы пытались изучить изменение поля со временем, используя среднеквадратические значения эффективного магнитного поля

$$\langle Be \rangle = [\sum (Be_i^2 - \sigma_i^2)/n]^{1/2},$$

введенные впервые в работе Брауна и др. (1981). Оказалось, что в первом приближении поле умень-

шается примерно как квадрат эволюционно изменяющегося радиуса, хотя поле диполя (в первом приближении структура магнитных полей CP-звезд дипольная) должно изменяться обратно пропорционально кубу радиуса. Этот результат следовало проверить. Интересно, что упомянутая зависимость имеет максимум после того, как звезды уже отошли от начальной главной последовательности и находятся вблизи полосы, занимаемой звездами V класса светимости. Зависимость «магнитное поле $\langle Be \rangle$ — возраст» была построена одна для всех типов CP-звезд. Позднее в работе Глаголевского, Чунтонова (1998) мы попытались построить такие зависимости для основных четырех типов CP-звезд отдельно. Несмотря на явный недостаток количества данных, можно было сказать, что в первом приближении магнитное поле у звезд He-rich растет в течение всего времени пребывания на главной последовательности и только в конце начинает падать. Поле звезд He-weak сначала растет, вблизи полосы, занимаемой звездами V класса светимости, достигает максимума и затем уменьшается. У звезд типа Si и SrCrEu тоже заметно уменьшение поля, но не заметны начальный рост и максимум. Таким образом, уменьшение поля при эволюционном увеличении радиуса уверенно заметно у звезд всех типов, начальный рост можно предполагать. Точно так же, по-видимому, ведут себя химические аномалии (Глаголевский, Чунтонов, 2001; Леушин и др., 2000): вначале их степень растет и, достигнув максимума посередине полосы главной последовательности, начинает уменьшаться. Среднеквадратические значения магнитного поля $\langle Be \rangle$ лишь приближенно характеризуют величину магнитного поля звезды, главным образом потому, что они зависят от ориентации звезды относительно наблюдателя. Наилучшим вариантом было бы использовать в таком исследовании среднее поверхностное магнитное поле B_s . К настоящему времени накопилось уже достаточно много измерений B_s , и в этой работе мы попытались использовать их для уточнения изучаемой зависимости.

2. Параметры

В табл.1 приведены известные значения средних поверхностных магнитных полей B_s -звезд, а также значения относительных радиусов R/R_z . R — это радиус звезды в настоящее время, а R_z — ее радиус, когда она была на начальной главной последовательности (ZAMS). $R/R_z(G)$ — это относительные радиусы, оцененные по абсолютным величинам из работы Гомез и др. (1998), которые были определены по гиппарховским параллаксам. Величины $R/R_z(\beta)$ определены нами по параметру мно-

гоцветной фотометрии β . Относительные радиусы связаны с $\lg g$ следующим соотношением:

$$\lg(R/R_z) = 0.5(\lg g(ZAMS) - \lg g),$$

оно получается из двух известных формул:

$$\lg g = \lg m + 4\lg T_e + 0.4M_b - 12.49,$$

$$\lg R/R_\odot = 8.46 - 2\lg T_e - 0.2M_b,$$

где для Солнца принято $T_e = 5780$ К, $\lg g = 4.44$, $M_b = +4.72$, m — масса звезды, M_b — ее болометрическая величина.

Использование относительных радиусов вместо $\lg g$ дает более наглядное представление о месте звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рессела и более правильные зависимости различных параметров от радиуса звезды.

Для оценок абсолютных величин M_b эффективные температуры взяты из каталога Глаголевского (2002). Для некоторых звезд в этом каталоге температур нет, поэтому мы оценили их заново по тем же калибровкам (приведены в табл.2). Величины R_z оценивались по M_b и путем смещения начального положения звезды вдоль эволюционного трека на диаграмме Герцшпрунга-Рессела до ZAMS. Место пересечения с ZAMS соответствовало M_b звезды. Как показано в работе Глаголевского (2002), средние ошибки величин $R/R_z(G)$ и $R/R_z(\beta)$ одного порядка — $\pm 0^m 2$. Болометрические поправки взяты из работы Страйжиса, Курилена (1981). В верхней части полосы главной последовательности существует некоторая неопределенность положения звезды относительно трека, но таких звезд очень мало и их влияние на зависимость получается незначительным.

Для того, чтобы иметь приблизительное представление о надежности оценок относительных радиусов двумя разными способами, мы привели в табл.1 колонку с величинами Δ (уклонение обеих величин от среднего значения). Видно, что в основном они невелики. В работе Глаголевского (2002) показано, что Δ заметно зависит от степени химических аномалий. Важное замечание состоит в том, что средние поверхностные магнитные поля B_s известны в основном только для звезд SrCrEu-типа, как видно из табл.1. Поэтому все дальнейшие выводы будут касаться звезд только этого типа.

3. Зависимость B_s от R/R_z

Зависимость, построенная по данным табл.1, приведена на рис.1А. Она характерна тем, что вблизи ZAMS наблюдается значительный разброс точек и резко выделяются три звезды с экстремально

Таблица 1: Параметры звезд с известным средним поверхностным магнитным полем B_s

HD	B_s	$R/R_z(G)$	$R/R_z(\beta)$	$R/R_z(\text{сред})$	Δ	Источник B_s	Тип
2453	3700	1.5	1.6	1.55	0.05	1	SrCrEu
5797	1800	1.9	-	1.9	-	2	SrCrEu
8441	100	2.1	2.3	2.20	0.10	2	SrCrEu
9996	4800	-	1.4	1.4	-	1	SrCrEu
12288	7900	1.9	1.7	1.80	0.10	1	SrCrEu
14437	7700	-	1.3	1.3	-	1	SrCrEu
18078	3800	2.8	2.4	2.60	0.20	1	SrCrEu
22374	500	1.9	-	1.9	-	2	SrCrEu
24712	2600	1.1	1.4	1.25	0.15	2	SrCrEu
29578	2700	1.6	-	1.6	-	1	SrCrEu
50169	4800	1.8	-	1.8	-	1	SrCrEu
55719	6500	1.9	1.8	1.85	0.05	1	SrCrEu
59435	3200	-	1.7	1.7	-	1	SrCrEu
61468	7100	1.2	-	1.2	-	1	SrCrEu
65339	12800	-	1.3	1.3	-	1	SrCrEu
70331	12300	-	1.1	1.1	-	1	Si
72968	2800	-	1.3	1.3	-	3	SrCrEu
75445	2990	1.2	-	1.2	-	1	SrCrEu
81009	8400	1.0	1.4	1.20	0.20	1	SrCrEu
93507	7250	1.8	-	1.8	-	1	Si+
94660	6200	-	1.6	1.6	-	1	Si+
110066	4100	-	1.1	1.1	-	1	SrCrEu
111133	3700	-	1.8	1.8	-	2	SrCrEu
112185	330	-	1.5	1.5	-	9	SrCrEu
112413	2900	1.4	1.1	1.25	0.15	5	SrCrEu
115708	3850	1.3	1.2	1.25	0.05	6	SrCrEu
116114	5900	1.3	1.6	1.45	0.15	1	SrCrEu
116458	4700	-	1.9	1.9	-	1 Si	
118022	2900	-	1.7	1.7	-	2	SrCrEu
119419	23000	1.2	1.1	1.15	0.05	6	Si+
126515	12300	1.3	-	1.3	-	1	SrCrEu
134214	3100	-	0.8	0.8	-	1	SrCrEu
137909	5500	1.8	1.2	1.50	0.30	1	He-w
137949	4700	1.5	1.1	1.30	0.20	1	SrCrEu
142070	4930	-	1.7	1.7	-	1	SrCrEu
147010	12000	1.0	1.0	1.0	0.00	9	Si+
165474	6500	-	1.4	1.4	-	1	SrCrEu
166473	7600	-	1.2	1.2	-	1	SrCrEu
175362	28000	1.0	1.2	1.1	0.10	7	He-w
176232	2100	1.6	1.9	1.75	0.15	2	SrCrEu
187474	5000	-	1.5	1.5	-	1	Si+
188041	3700	-	1.2	1.2	-	1	SrCrEu
191742	1800	2.8	2.1	2.45	0.35	2	SrCrEu
192678	4700	-	1.6	1.6	-	2	SrCrEu
196502	2000	-	2.5	2.5	-	2	SrCrEu
335238	9880	1.8	-	1.8	-	1	SrCrEu
200311	8760	1.3	1.4	1.35	0.05	1	Si+
201601	3800	1.0	1.4	1.2	0.20	1	SrCrEu
204411	500	-	1.2	1.2	-	2	Si
208217	7900	1.4	-	1.4	-	1 Si	
215441	34000	1.2	1.0	1.1	0.10	8	Si
216018	5660	1.3	-	1.3	-	1	SrCrEu
221568	1800	1.6	-	1.6	-	2	SrCrEu

Источники B_s :

- | | | |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1. Матис и др. (1997) | 4. Глаголевский, Герт (2001) | 7. Матис (1997) |
| 2. Престон (1971) | 5. Глаголевский и др. (1985) | 8. Борра, Ландстрит (1978) |
| 3. Романюк (2000) | 6. Глаголевский (2001) | 9. Глаголевский (1998) |

большими полями. Они относятся к звездам разных типов пекулярности — это HD 119419, 175362, 215441. Заметно также уменьшение поля с возрастом, хотя разброс точек достаточно велик и можно говорить только о тенденции постепенного уменьшения поля. Как было сказано выше, магнитное поле, вероятно, появляется на поверхности вблизи выхода звезд на ZAMS после стадии эволюции Ae/Be Хербига, что хорошо видно и на рисунке. Если полный поток не испытывает никаких потерь, кроме омической диссипации (Глаголевский, Чунтонов, 2001), то среднее поверхностное магнитное поле должно уменьшаться со временем вследствие эволюционного увеличения радиуса пропорционально R^{-3} , если оно обладает дипольной структурой.

В условиях той степени ионизации, которая имеется внутри звезд, время омической диссипации составляет $\tau \sim 10^9 - 10^{10}$ лет, т.е. существенно больше времени жизни на Главной последовательности (Глаголевский и др., 1987). Мы подобрали предполагаемую кубическую зависимость так, чтобы максимально приблизить ее к наблюдаемым значениям: $B_s(\text{cp}) = 18 \cdot R^{-3}$ (на рис.1А — сплошная линия). Для того чтобы выяснить, как наблюдаемые значения магнитного поля отклоняются от предполагаемых значений, были вычислены их разницы $\Delta B_s = B_s - B_s(\text{cp})$ на тех же R/R_z , приведенные на рис.1В. Три экстремальные звезды располагаются особняком. В среднем точки симметрично располагаются вдоль средней линии. Таким образом, можно предположить, что не существует противоречия с предположением, что ход B_s пропорционален R^{-3} . На первый взгляд, этому предположению противоречит резкое отличие от остальных трех экстремальных звезд и группы звезд ниже средней линии. Для прояснения этого противоречия мы построили зависимость отношения $B_s/B_s(\text{cp})$ от R/R_z , представленную на рис.1С. Хорошо видно, что относительное рассеяние точек во всем диапазоне R/R_z одинаково. Следовательно, большие значения поля у звезд, находящихся вблизи ZAMS, не являются исключением. Из табл.1 видно, что наши зависимости построены в основном для звезд SrCrEu-типа, поэтому выводы из данной работы относятся преимущественно к этим звездам. В наших работах (Глаголевский, Чунтонов, 1998; Леушин и др., 2000) показано, что уменьшение поверхностного поля с возрастом происходит и у звезд других типов, и что вблизи ZAMS у звезд типа He-r, He-w, без сомнения, происходит рост поля. Что касается звезд SrCrEu-типа, то фаза роста поля не наблюдается вследствие очень короткого времени (предположительно 10^6 лет) по сравнению с временем жизни на Главной последовательности, поэтому на получен-

ных зависимостях она незаметна.

Таким образом, изменение поверхностного магнитного поля CP-звезд при их эволюции на главной последовательности, очевидно, происходит в результате эволюционного увеличения радиуса.

К сожалению, вследствие наблюдательной селекции изучается слишком мало звезд вблизи $R/R_z > 2.5$. Звезды относят к CP-типу только тогда, когда аномалии сильно выражены. Во время нахождения вблизи ZAMS, когда поле и аномалии еще только растут и слабы, такие CP-звезды не выделяются и изучение этого периода затруднительно.

Экстраполяция полученной средней кубической зависимости на ZAMS показывает, что среднее магнитное поле у магнитных звезд на начальной главной последовательности должно было составлять в среднем $B_s \approx 18$ кГ. Это свойство требует дальнейшего изучения.

Как уже было сказано, изменение среднеквадратического поля $\langle Be \rangle$ с возрастом (Глаголевский, 1988) происходит обратно пропорционально квадрату радиуса звезды. Отличие этой зависимости от зависимости для B_s является, вероятно, следствием того, что среднеквадратическое поле зависит от ориентации звезды по отношению к наблюдателю, и соотношение “размывается” из-за большого рассеяния точек. Проверка зависимостей $B_s \sim R^{-2}$ и $B_s \sim R^{-4}$ показывает сильную асимметрию (рис.1В,С) — это свидетельствует о том, что такие зависимости не удовлетворяют наблюдательным данным.

Таблица 2: Температуры магнитных звезд

HD	Te, K	HD	Te, K
29578	10100	134214	11200
59435	9900	142070	9800
61468	10200	165474	10000
70331	14300	166473	11300
75445	10500	335238	9800
93507	81010	200311	13500
116114	9900	208217	10700
116458	10100	216018	7400*
119419	11000		

*) Хубриг и др. (2000)

4. Заключение

Использование более точного материала позволило получить данные, подтверждающие сделанный ранее предварительный вывод (Глаголевский, 1988), что среднее поверхностное магнитное по-

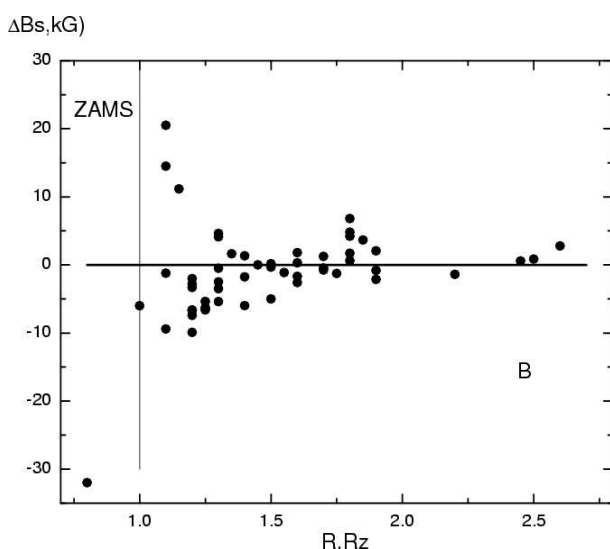
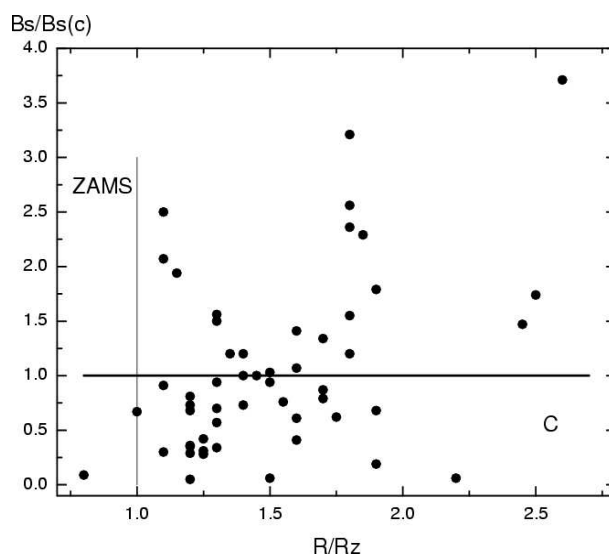
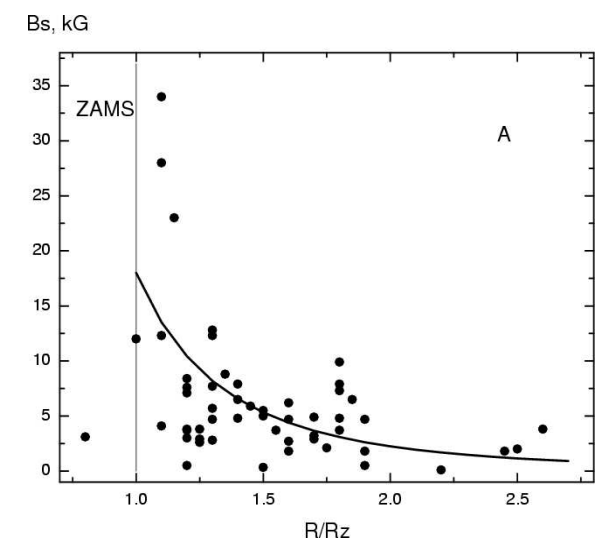


Рис. 1: *A* — зависимость величины среднего поверхностного магнитного поля CP-звезд от их относительного радиуса R/R_z ; *B* — зависимость величины отклонений $\Delta B_s = B_s - B_s(c)$ от относительных радиусов R/R_z ; *C* — зависимость относительных значений $B_s - B_s(c)$ от относительных радиусов R/R_z .

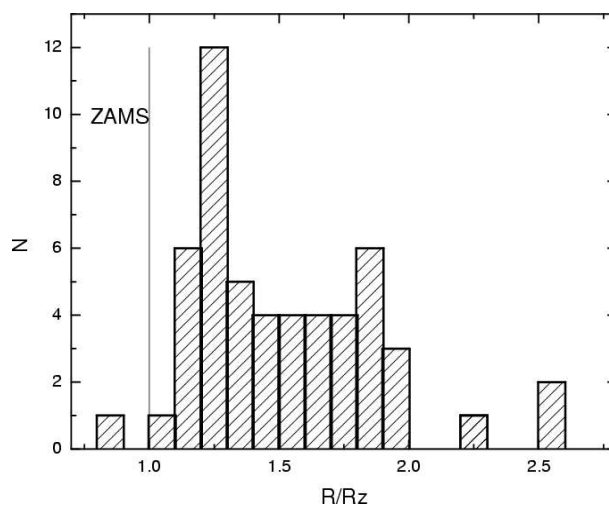


Рис. 2: Гистограмма распределения числа звезд с известными B_s по разным относительным радиусам R/R_z .

ле CP-звезд уменьшается обратно пропорционально кубу радиуса, как и предполагается в случае дипольной конфигурации поля. Поскольку оценки времени чисто омической диссипации магнитного поля дают величины много больше времени жизни звезд на Главной последовательности, то наличие кубической зависимости не противоречит предположению, что полный магнитный поток не изменяется в течение всего времени пребывания звезды на главной последовательности, что магнитное поле уменьшается только вследствие омической диссипации и нет других источников его разрушения, таких как дифференциальное вращение, меридиональная циркуляция, турбулентция и др. В случае существования дополнительных источников диссипации поверхностное поле уменьшалось бы быстрее. Атмосфера звезды настолько стабильна, что появляются условия для диффузии химических элементов, приводящей к химическим аномалиям.

Вследствие недостаточного количества данных мы не смогли получить четкие сведения о поведении магнитного поля вблизи начальной главной последовательности. Левая граница на рассматриваемых зависимостях обозначается довольно резко, что свидетельствует о достаточно коротком времени появления магнитного поля по сравнению со временем жизни на главной последовательности. Это хорошо видно также на рис.2, где пред-

ставлена гистограмма количества звезд на разных R/R_z .

Экстраполяция средней зависимости B_s на линию нулевого возраста показывает, что в период выхода магнитных звезд на главную последовательность магнитное поле звезд имеет в среднем величину 18 kG.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта программы “Астрономия”.

Список литературы

- Борра, Ландстрит (Borra E.F., Landstreet J.D.), 1978, *ApJ*, **222**, 226
- Браун и др. (Brown D.N., Landstreet J.D., Thompson I.), 1981, *Comm. 23-d Coll.Liege*, 195
- Глаголевский и др. (Glagolevskij Yu.V., Piskunov N.E., Khokhlova V.L.), 1985, *Astron. J. Lett. (Rus)*, **11**, 371
- Глаголевский и др. (Glagolevskij Yu.V., Klochkova V.G., Korylov I.M.), 1987, *AJ*, **64**, 360
- Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 1988, in: “Magnetic stars”, eds.: Yu.V. Glagolevskij, I.I.Romanyuk, Leningrad, Nauka, 206
- Глаголевский, Чунтонов (Glagolevskij Yu. V., Chountonov G. A.), 1998, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **45**, 105
- Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 1998, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **46**, 123
- Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 2001, *Astrophysics*, **44**, 121
- Глаголевский, Чунтонов (Glagolevskij Yu.V., Chountonov G.A.), 2001, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **51**, 88
- Глаголевский, Герт (Glagolevskij Yu.V., Gerth E.), 2001, in: “Magnetic fields across the HR diagram, ASP Conference Series”, Eds: Mathys G., Solanski S.K., Wickramasinghe D.T., **248**, 337
- Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 2002, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **53**, 33
- Гomez и др. (Gomez A.E., Luri X., Grenier S., Figureas F., North P., Royer F., Torra J., Mennessier M.O.), 1998, *ApJ*, **336**, 953
- Леушин и др. (Leushin V.V., Glagolevskij Yu.V., North P.), 2000, in: “Magnetic fields of chemically peculiar and related stars”, eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, Moscow, 2000, 173
- Матис и др. (Mathys G., Hubrig S., Landstreet J.D., Lanz T., Manfroid J.), 1997, *A&AS*, **123**, 353
- Матис (Mathys G.), 1997, *A&AS*, **124**, 475
- Престон (Preston G.), 1971, *ApJ*, **164**, 309
- Романюк (Romanyuk I.I.), 2000, in: “Magnetic fields of chemically peculiar and related stars”, Eds.: Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I., Moscow, 18
- Страйжис, Курилене (Strayzis V.L., Kuriliene G.), 1981, *Astrophys. Space Sci.*, **80**, 353
- Хубриг и др. (Hubrig S., North P., Mathys G.), 2000, *ApJ*, **539**, 352