

ПЕРИОДЫ ВРАЩЕНИЯ СР-ЗВЕЗД С РАЗНЫМИ
ВЕЛИЧИНАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ю. В. ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 28 декабря 2010

Принята к печати 16 марта 2011

На основании данных о средних поверхностных величинах магнитного поля B_s для химически пекулярных звезд исследована зависимость периодов вращения от магнитного поля. Для исключения влияния зависимости B_s от возраста звезд (за счет изменения радиуса) они были приведены к одинаковому относительному радиусам в полосе V класса светимости. Полученная зависимость с достаточной уверенностью описывается полиномом второй степени, причем она имеет максимум в районе периодов $P = 10$ дней. Сделано предположение, что зависимость отражает результаты сложения нескольких процессов, имевших место на ранних стадиях эволюции.

Ключевые слова: *звезды; магнитные звезды*

1. *Введение.* Проблема связи магнитного поля с вращением обсуждалась неоднократно. Например, в работах, поддерживающих механизм генерации магнитного поля у магнитных химически пекулярных звезд (СР), предполагается пропорциональность величины магнитного поля скорости вращения $B \propto \Omega$ [1,2]. Если поле имеет реликтовую природу, т.е. оно возникло при сжатии намагниченных межзвездных облаков во время образования звезды, то величины полей B и Ω не должны зависеть друг от друга. Известно, что магнитные СР-звезды имеют существенно меньшие скорости вращения, чем нормальные звезды и предложена гипотеза, предполагающая, что они потеряли момент вращения вследствие "магнитного" торможения. В таком случае должна наблюдаться зависимость $\Omega \propto 1/B$. Могут быть и другие эффекты, влияющие на магнитное поле и вращение. Зависимость между магнитным полем и вращением до конца не изучена.

2. *Предыдущие результаты.*

А. В работе [3] на основании измерений 16 звезд исследовалось соотношение между величиной среднего продольного эффективного магнитного поля B_e и скоростью вращения $\omega \sin i$. Вывод состоял в том, что быстро вращающиеся СР-звезды в среднем имеют меньшее поле, чем медленно вращающиеся. Таким образом, авторы предположили существование антикорреляции между величиной поля и скоростью вращения, что не

соответствует гипотезе динамо, реликта, но подходит гипотезе "магнитного" торможения. Однако надо отметить, что в данном случае использовался слишком скудный наблюдательный материал и брались величины среднего эффективного магнитного поля Be , хотя правильнее было бы использовать среднее поверхностное поле B_s .

В. В работах [4,5] для исследования аналогичных зависимостей использовались не Be , которые находятся под влиянием неопределенности угла наклона звезды i , а средние значения поверхностного магнитного поля B_s (70 звезд) и средние квадратические значения поля $\langle Be \rangle$ (200 звезд), которые точнее Be . Оказалось, что до $P=8^d$ поле растет, а затем уменьшается. Уменьшение поля прослежено до $P=40^d$. Такая форма зависимости противоречит гипотезе динамо, гипотезе реликтового поля, а также и гипотезе потери момента вращения с участием магнитного поля.

С. В работах [6,7] рассмотрены зависимости магнитного поля от периода вращения на основании модельных оценок B_s . К сожалению количество звезд невелико: для $P < 25^d$ было 19, а для $P > 25^d$ только 8. В первом случае линейная регрессия получилась с незначимым углом наклона

$$B_s = (9.52 \pm 3.64) - (0.18 \pm 0.32) \cdot P,$$

а во втором

$$B_s = (9.76 \pm 1.85) - (1.53 \pm 0.66) \cdot P.$$

Такая форма зависимости в левой части $P < 25^d$ не противоречит гипотезе реликта, но не соответствует гипотезе потери момента вращения с участием магнитного поля и гипотезе динамо в правой части $P > 25^d$. Таким образом не подтвердилась зависимость левой части графика варианта В для малых периодов, но подтвердилась правая часть [4,5] для больших периодов, хотя и недостаточно надежно. Не подтвердился также вывод работы А [3].

В работе [8] изучаемая зависимость уже была построена по данным, частично приведенным во втором столбце табл.1. Авторы этой работы предполагают наличие антикорреляции во всем диапазоне P , однако разброс точек велик и вывод ненадежен. Чтобы проверить, могло ли бы это следовать из возможной корреляции между эффективной температурой и периодом вращения, эти авторы отложили P против $(b - y)$ для звезд исследованной выборки. Из рассмотрения этого графика был сделан вывод, что период не зависит от температуры (такой же вывод был сделан в [8]).

Таким образом, в рассматриваемой работе [8] (рис.5) не подтверждается наличие прямой корреляции $B_s \propto P$ в диапазоне $P < 8^d$ (как в [6,7]), но подозревается обратная корреляция в диапазоне всех периодов.

Из всех звезд, которые приведены во втором столбце табл.1, только HD 208217 имеют двухволновую кривую изменения поля, в то время как все другие имеют только один минимум и один максимум за вращательный цикл. Это указывает на то, что поля всех этих звезд не соответствуют

центральному диполю. Действительно, при центральном диполе поле должно испытывать два максимума в моменты прохождения полюсов через центральный меридиан и два минимума при прохождении экваториальных областей. Это заключение такое же, какое получено в работе [9] при рассмотрении поля в других, более быстро вращающихся Ар-звезд. Это исследование подтверждает, что недостаток симметрии магнитного поля, который в прошлом подозревался только у некоторых, возможно исключительных объектов, на самом деле широко распространен [10]. Это еще раз подтверждает необходимость использования для статистических исследований средних величин B_s , выведенных из достаточно большого числа измерений, а также полученных из модельных расчетов. Именно такие данные мы попытались использовать в настоящем исследовании.

Д. В работе [11] зависимость $B_s - \log P$ была исправлена за влияние возрастного изменения поверхностного магнитного поля. Линия регрессии получилась следующей

$$B_s = (16526 \pm 3426) + (-2710 \pm 1220) \cdot \log P .$$

Таким образом, снова наметилась обратная корреляция во всем диапазоне периодов, но угол наклона недостаточно надежен, его величина находится в пределах 2σ . Полученная зависимость с значительной вероятностью противоречит гипотезам реликта и "магнитному" торможению СР-звезд.

3. *Новая зависимость $B_s - \log P$.* В табл.1 собраны все звезды, для которых известны периоды вращения и средние поверхностные (а не B_e) величины магнитного поля B_s . Во втором столбце приведены величины,

Таблица 1

ВЕЛИЧИНЫ СРЕДНЕГО ПОВЕРХНОСТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ B_s

HD	B_s , Гс[1]	B_s , Гс[2]	B_s , Гс [3]	Период, дней
1	2	3	4	5
2453	3737	3750		547
3360		294		5.4
4778		2600:		2.6
5737		3190:		21.6
9996	4831	5000:		8000
11503		1000:		1.6
12098		2450		5.5 [4]
12288	7879	8100		35
12447		782		1.5
14437	7665			13.4 [5]
18296		890:		29
19832		495:		0.7
21699		6150		2.5

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5
22470		2350		1.9
24712		1250:		12.5
32633		12000		6.4
34452		1000:		2.5
35502		6500: [6]		1.7
37776		30000 [9]		1.5
40312		650		3.6
45583		16000:		1.2:
51684			6100	375 [3]
55719	6500			36.5
59435	3234			>1095 [8]
61468			6800	322 [3]
65339	12840	13250		8.0
70331	12312			2.0 [3]
75049		27430		4.0 [7]
81009	8301			34
93507	7154			550
94660	6175			6175:
110066	4095			4900/9800?
112185		330		5.1
112413		2600		5.5
115708		3850:		5.1
116114			5960	27.6 [3]
116458	4676	4650		148
119419		23000		2.6
124224		2200		0.5
126515	12322	13500		130
134214	3091			248
144897			9000	48.4 [3]
147010		12000:		3.9
166473			7000	4400 [3]
178892		17440		8.2[4]
137909	5499	5500		18.5
137949	4676			7.2
142070	4923			3.4
144897	9014			48
318107	13307			9.7 [6]
165474	6523			23.4?
166473	7649			4400 [6]
187474	5317	5500		2345:
188041	3663	3600		224
192678	4764	4700:		6.4
335238	8706			11.2
200311	8568	8500		52
201601	3845	3800:		25550:
208217	7957			8.4
215441	34000	34000		9.5
318107			15000	9.7 [6]

Примечания к таблице

1. *G.Mathys, S.Hubrig, J.D.Landstreet et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 123, 353, 1997.
2. Ю.В.Глаголевский, *Астрофиз. Бюлл.*, 2011 (в печати).
3. *J.D.Landstreet, G.Mathys*, *Astron. Astrophys.*, 359, 213, 2000.
4. *T.A.Ryabchikova, O.Kochukhov et al.*, *Astron. Astrophys.*, 445, L47, 2006.
5. *V.D.Bychkov, L.V.Bychkova, J.Madej*, *Astron. Astrophys.*, 430, 1143, 2005.
6. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, 53, 157, 2010.
7. *V.G.El'kin, G.Mathys, D.W.Kurtz et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 402, 1883, 2009.
8. *I.I.Romanyuk*, in "Magnetic fields of CP and related stars", ed. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, Moscow, 2000, p.18.
9. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, in *Magnetic fields across the HR diagram*, ASP Conf. Ser. V248, p.337, 2001.

Величины B_s из работы [3] сняты с графиков.

измеренные непосредственно из зеемановского расщепления спектральных линий. В третьем столбце находятся данные, полученные из моделей. Величины B_s с точками означают, что к звезде применялась модель центрального диполя вследствие малого числа измерений. Периоды вращения в четвертом столбце взяты в основном из каталога [12], они округлены до десятых долей. В тех случаях, когда B_s получены из непосредственных измерений, модельные величины не использовались. Приведенный список содержит больше объектов (56), чем в аналогичных работах, сделанных раньше, а модельные данные получены более надежным методом. Поэтому имеет смысл снова рассмотреть искомую зависимость. Она показана на

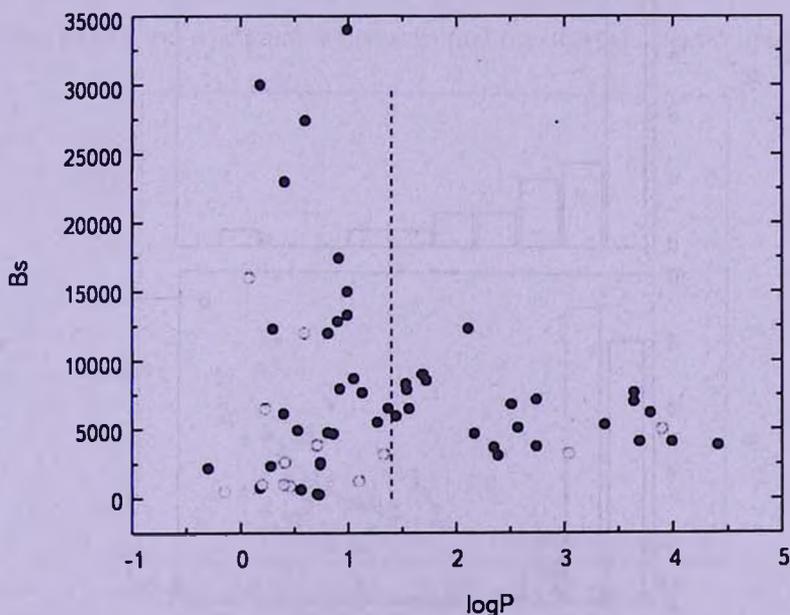


Рис.1. Связь между средним поверхностным магнитным полем B_s и периодом вращения. Черные точки - уверенные данные, белые - неточные данные. Вертикальная линия - граница между быстрыми ротаторами ($P < 25^d$) и медленными ротаторами ($P > 25^d$).

рис.1, где черными кружками обозначены надежные величины B_s , а белыми - приближенные (впрочем, не заметно, чтобы их положение как-то отличалось от остальных). Как и во всех предыдущих исследованиях заметна обратная корреляция, по крайней мере для звезд с $P > 25^d$ (граница - вертикальная линия), потому что она построена практически на основании прежних данных. Линейная регрессия

$$B_s = (10552 \pm 1695) - (1450 \pm 865) \cdot \log P$$

по-прежнему показывает не 100% уверенность угла наклона, величина его составляет около 2σ . Все величины B_s приняты равноточными. Левая часть зависимости, построенной в значительной мере по новым данным ($P < 25^d$), показывает отсутствие корреляции. Линейная регрессия для этой части зависимости получается следующей

$$B_s = (4614 \pm 221) - (4805 \pm 3625) \cdot \log P.$$

Этот результат подтвердил наш предыдущий вывод в [3]. На рис.2а и б показано распределение звезд по величине поля для быстрых и медленных ротаторов, соответственно. Очевидно, что различие в распределениях для рассматриваемой проблемы существенно. Недосток медленных ротаторов на рис.2б с величинами магнитного поля в диапазоне $B_s < 5$ кГс скорее

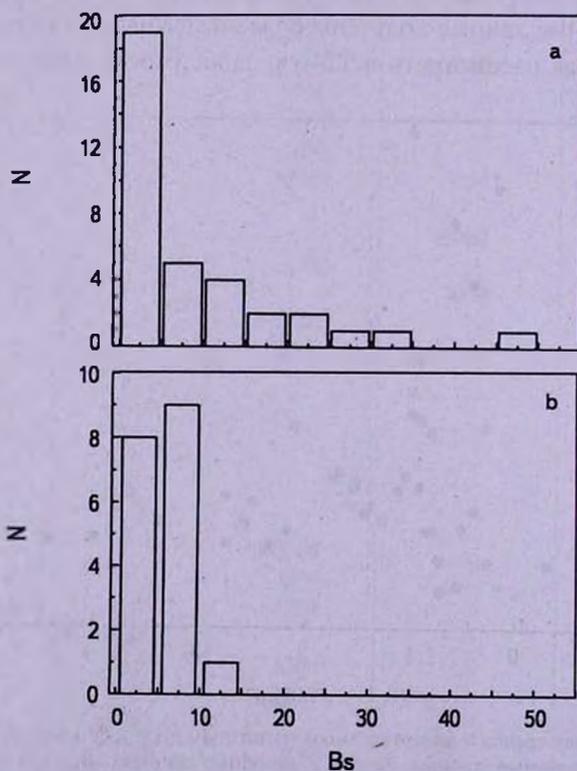


Рис.2. Распределение звезд по величине B_s . а) быстрые ротаторы, б) медленные ротаторы.

всего связан не с физикой магнитных звезд, а с недостаточной чувствительностью метода измерений, т.е. сказывается наблюдательная селекция. Если это так, то добавление звезд с малыми полями должно увеличить наклон зависимости $B_s - \log P$ на рис.1. Тогда обратная зависимость может оказаться более надежной.

Следует особо отметить, что магнитное поле B_s по мере эволюционного движения поперек полосы Главной последовательности уменьшается вследствие увеличения радиуса [13] по кубической зависимости. На рис.3 приведена зависимость $B_s - R/R_z$, где R/R_z - радиус звезды по отношению к ее радиусу на ZAMS. На верхней границе полосы Главной последовательности звезды имеют радиус в ~ 3 раза больше, чем на ZAMS. Однако полный магнитный поток сохраняется в течение всего времени жизни на Главной последовательности, как было показано в [13]. (На рис.3 кривой проведена средняя кубическая зависимость). Поэтому изучаемая зависимость на рис.1 искажена возрастными изменениями. Для учета этого эффекта измеренные величины B_s были приведены к одинаковому относительному радиусу $R/R_z = 1.3$, соответствующему последовательности V класса светимости, где звезды проводят значительную часть своей жизни, по методике, описанной в работе [14]. Оказалось (рис.4а), что линейная регрессия в случае исправленной зависимости имеет нулевой угол наклона

$$B_s = (8046 \pm 1377) - (9 \pm 726) \cdot \log P .$$

Хорошо видно, что в результате проведенной процедуры исчезло преобладание

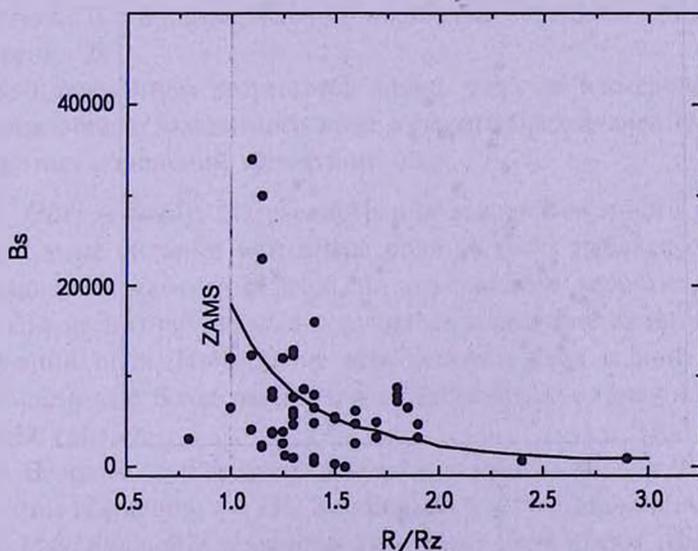


Рис.3. Зависимость величин поверхностного магнитного поля от относительного радиуса звезды R/R_z (R - радиус звезды в настоящее время, R_z - ее радиус на ZAMS)

звезд с экстремальными магнитными полями в левой части рис.1. Зависимость $B_s - \log P$ стала более равномерной, что не противоречит гипотезе реликта. Однако форма зависимости выглядит явно дугообразной. Это хорошо видно на рис.4b, где показана та же зависимость, но проведенная по скользящим средним величинам. Описание ее в виде полинома второй степени дает наименьшие ошибки коэффициентов. Такая зависимость приведена на рис.4a штриховой линией, а параметры полинома даны в табл.2.

$$B_s = A + B_1 \cdot \log P + B_2 \cdot (\log P)^2 .$$

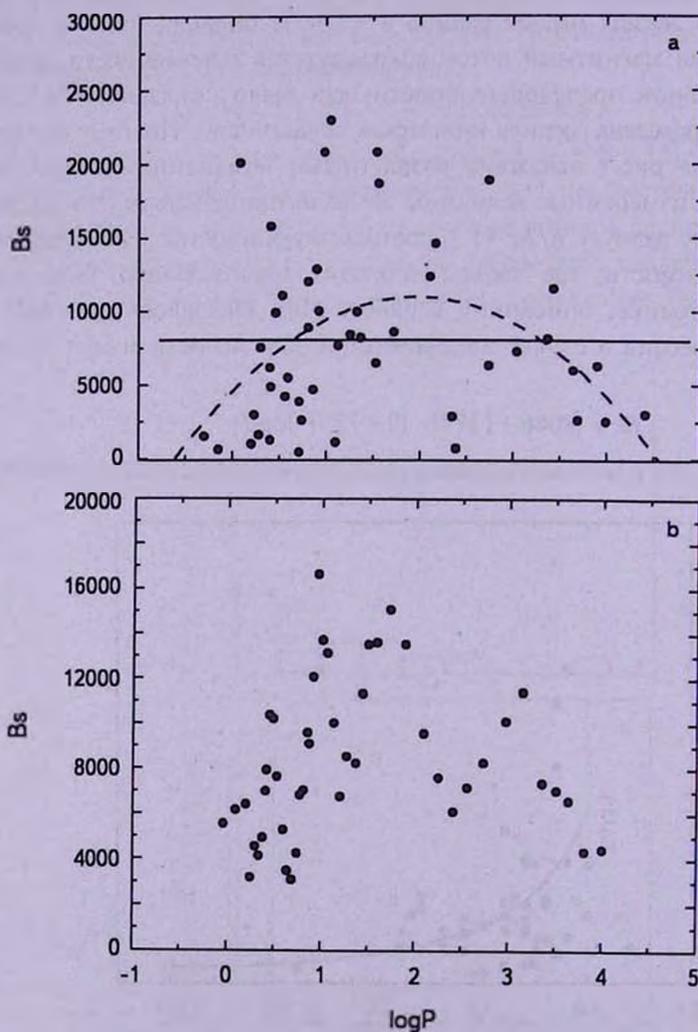


Рис.4. а - Связь между средним поверхностным магнитным полем B_s и периодом вращения после приведения B_s к моменту V класса светимости ($R/R_z = 1.3$). Прямая линия - линейная регрессия, штриховая линия - аппроксимация в виде полинома. б - то же, но точки получены методом скользящего среднего.

Ошибки параметров приближаются к 3σ , что показывает, что зависимость может быть реальной. Разброс точек вызван не только неточностью использованных данных, но и большим реальным разбросом величин магнитного поля.

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ ПОЛИНОМА

	Коэффициент	Ошибка
A	4578	1792 (2.56 σ)
B1	6480	2432 (2.66 σ)
B2	-1645	592 (2.79 σ)

Интересно изучить отдельно левую часть ($\log P < 1$) и правую часть ($\log P > 1$) исследуемой зависимости. Линейные регрессии левой и правой части, соответственно, получаются следующими

$$B_s = (4614 \pm 2214) + (4804 \pm 3629) \cdot \log P \quad (1.3\sigma),$$

$$B_s = (14431 \pm 3013) - (2269 \pm 1152) \cdot \log P \quad (1.97\sigma).$$

Ошибки выросли, вероятно, потому, что зависимости на самом деле не линейные и в каждой из них участвует меньшее количество точек. Результат подтверждает зависимость, описанную в пункте В, а максимум на $P = 10^d$ приходится на близкое полученное там значение. Можно предположить, что эта зависимость состоит из двух, направленных в противоположные стороны: одна соответствует прямой корреляции, другая обратной. Для подтверждения крайне необходимы дополнительные измерения B_s .

Из приведенных результатов видно, что при исследованиях разных зависимостей от магнитного поля в некоторых случаях необходим учет возрастных изменений магнитного поля.

4. *Обсуждение.* Из рассмотрения вышеизложенного следует:

1) Самые сильные магнитные поля на рис.1 наблюдаются у быстро вращающихся магнитных звезд, но это свойство, вероятно, не связано с физикой магнитных звезд, а получилось вследствие влияния возрастных изменений поля. Приведение всех величин поля к моменту V класса светимости дает более равномерное распределение точек на зависимости $B_s - \log P$ (рис.4).

2) Вероятно существуют заметные корреляции $B_s \propto P$ в диапазоне периодов вращения $P < 25^d$, а также $B_s \propto 1/P$ в диапазоне $P > 25^d$.

3) Максимальные величины магнитного поля имеют звезды в среднем $P = 10^d$, что примерно совпадает с максимумом на $P = 8^d$, найденным в [5,13].

4) Исправленная за возраст зависимость $B_s - \log P$, возможно, состоит из суммы, по крайней мере, двух: $B_s \propto P$ и $B_s \propto 1/P$, что приводит к появлению упомянутого максимума.

5) Использование новых более точных данных привело к более определенному представлению о взаимозависимости поля и вращения, однако для окончательного решения проблемы необходимы дополнительные измерения средних поверхностных величин магнитного поля B_s и более точные их коррекции за возраст.

Приведенные данные в принципе согласуются с гипотезой магнитного динамо, которая требует заметной обратной корреляции величины поля и периода вращения ($P > 6^d - 8^d$), но которая кажется слишком слабой. Кроме того, гипотеза динамо в настоящее время не поддерживается. Прямая корреляция между B_s и P может быть связана только с единственной в настоящее время гипотезой "магнитного" торможения ($P < 6^d - 8^c$). Если на самом деле природа магнитного поля реликтовая, то необходимо объяснить причину дугообразной формы зависимости $B_s - \log P$.

В работах [6,7] показано, что вероятность стать магнитной звездой больше у медленных ротаторов. Очевидно, что у медленных ротаторов больше вероятность сохранить начальное магнитное поле вследствие более стабильных атмосфер. В таком случае у звезд с большими периодами поле должно было быть больше, чем у звезд с малыми периодами. В работе [7] сделан вывод, что особенности формирования магнитных звезд и их свойств следует искать в начальных фазах их образования в зависимости от свойств протозвездных облаков. Следовательно, надо учитывать и этот фактор влияния на изучаемую зависимость. Наблюдаемая форма зависимости может быть суммой наложения нескольких факторов.

Наблюдаемая произвольность углов β между осью диполя и осью вращения противоречит динамо, но подтверждает преимущественное количество звезд с $\beta \sim 90^\circ$ [10].

Приведенные противоречия требуют дальнейших исследований, особенно связанных с уточнением рассмотренных зависимостей.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Россия
e-mail: glagol@sao.ru

ROTATIONAL PERIODS OF CP-STARS WITH DIFFERENT MAGNETIC FIELD VALUES

Yu.V.GLAGOLEVSKIJ

The relation between rotational periods and magnetic fields has been investigated on the basis of the data on average surface magnetic field values for chemically peculiar stars. To exclude the influence of the dependence between the surface magnetic field B_s and the age of stars (due to the radius changing) they were reduced to equal relative radii in the V luminosity class band. With a sufficient confidence the obtained relation is described by a second degree polynom, and it has the maximum near period of 10 days. It has been made the assumption, that the relation is a result of combination of several processes, having a place at early stages of evolution.

Key words: *stars:magnetic stars*

ЛИТЕРАТУРА

1. *F.Krause, K.-H.Raedler*, in: Solar Magnetic Fields, ed. R.Hovard, Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, p.770, 1971.
2. *L.Mestel*, in: IAU Coll. N 32 "Physics of Ap-stars", ed. W.Weiss, H.Jenker and C.Jaschek, Vienna Univ., p.1, 1975.
3. *J.D.Landstreet, E.F.Borra, I.R.D.Angel et al.*, Astrophys. J., 201, 624, 1975.
4. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, 22, 545, 1985.
5. *Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, N.M.Chunakova*, in: Upper main seq. stars with anomalous spectra, Reidel Comp., p.33, 1986.
6. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, 46, 399, 2003.
7. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, 48, 229, 2005.
8. *G.Mathys, S.Hubrig, J.D.Landstreet et al.*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 123, 353, 1997.
9. *G.Mathys*, in: IAU Coll. No 138, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 44, 232, 1993.
10. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофиз. Бюлл., 2011 (в печати).
11. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, 49, 251, 2006.
12. *F.A.Catalano, P.Renson*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 127, 421, 1998.
13. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, 22, 545, 1985.
14. *Ю.В.Глаголевский, Е.Герт*, Бюлл. САО, 58, 17, 2005.
15. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, 46, 399, 2003.