

## К ПРОБЛЕМЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

Ю. В. Глаголевский

По литературным данным составлен список Ap-звезд с известным периодом вращения  $P$ , хорошо изученным магнитным полем  $B_s$  и другими параметрами. Различные системы эффективных температур  $T_e$ , в том числе определенных по данным  $UBV$ -фотометрии, сведены к единой системе Адельмана (серия работ). Показано, что радиусы звезд  $R$ , оцененные по эмпирическим зависимостям  $R(T_e)$ , для главной последовательности более точны, чем если воспользоваться опубликованными в литературе  $\lg g$ . Сделан вывод, что приводимые в литературе значения  $v \sin i$  для Ap-звезд в среднем на 30 % завышены, вероятно, из-за ошибок измерений и влияния магнитного расширения спектральных линий. Проанализирована точность определения угла наклона  $i$  звезд Ap при предположении дипольного характера поля и показано, что углы крайне неточны из-за ненадежности  $v \sin i$ . Получены данные, свидетельствующие об отсутствии преимущественной ориентации угла наклона диполя  $\beta$  к оси вращения. Вычислены поверхностные магнитные поля  $B'_s$  для 37 звезд при предположении дипольного характера магнитного поля звезд. Подтвержден наш предыдущий вывод о том, что  $B'_s > B_s$ , где  $B_s$  — поверхностное магнитное поле, определенное Крамером и Мидером на основе параметров Женевской фотометрии. Зависимость между  $B'_s$  и  $B_s$  существует, однако разброс велик, вероятно, из-за ошибок.

From the literature data a list of Ap-stars is made with the known rotation period  $P$ , well studied magnetic field  $B_s$ , and other parameters. The different systems of the effective temperatures  $T_e$  including those defined from the data of  $UBV$ -photometry, are reduced to Adelman's system (a set of papers). It is shown that the radii  $R$  of the stars estimated from the empirical dependences  $R(T_e)$  for the Main sequence are more accurate than those obtained using the published in literature  $\lg g$ . A conclusion is drawn that  $v \sin i$  values for Ap-stars, given in literature, are on the average by 30 % higher, probably due to the measurement errors, and the influence of magnetic broadening of the spectral lines. The accuracy of determination of the inclination angle  $i$  for Ap-stars is analyzed in the assumption of a dipole character of the field and it is shown that the angles are extremely unaccurate due to the unreliability of  $v \sin i$ .

Data are obtained indicating the absence of preferential orientation of  $\beta$  dipole inclination angle to the rotation axis. The surface magnetic fields  $B'_s$  are calculated for 37 stars in the assumption of the dipole character of the stellar magnetic field. The earlier conclusion is confirmed, that  $B'_s > B_s$ , where  $B_s$  is a surface magnetic field determined by Cramer and Meader on the basis of parameters of Geneva photometry. There is a dependence between  $B'_s$  and  $B_s$ , however, the scatter is rather significant, probably, due to the errors.

В нашей предыдущей работе [1] исследовалось соотношение между поверхностными магнитными полями звезд  $B_s$ , вычисленными Крамером и Мидером [2] на основе параметров Женевской многоцветной фотометрии, и вычисленными нами полями  $B'_s$  из продольного поля  $B_e$  на основе дипольной модели магнитного поля звезд. В этой работе было продемонстрировано, что физические параметры, такие как скорость вращения  $v \sin i$ , эффективные температуры  $T_e$ , радиусы и др., приводимые в литературе, крайне неточны. В данной работе мы поставили задачу проанализировать эти параметры на большем материале, выяснить, как ошибки влияют на конечный результат — вычисленные на их основе  $B'_s$ , а также сопоставить  $B'_s$  и  $B_s$ .

Для этого мы собрали из литературы достаточное количество звезд с известным периодом вращения  $P$  и хорошо изученным магнитным полем (имеющим кривые изменения  $B_e$ ). Эти данные приведены в табл. 1. В этой же таблице содержатся величины  $B_s$  из [2], скорости вращения  $v \sin i$  из [3—6], полученные нами эффективные температуры  $T_e$ , радиусы звезд  $R$  в единицах радиуса Солнца и другие параметры, обсуждаемые в следующих параграфах.

1. Эффективные температуры. Проблема эффективных температур уже обсуждалась нами в [7]. В этой работе дана сводка  $T_e$  для 56 Ap-звезд, приве-

ТАБЛИЦА 1  
 Параметры звезд

HD	P, дней	$B_s$ , Гс	$v \sin i$ , км/с	$T_e$	$R(V)$	$v$ , км/с	$i(V)$	$i_0$
4778	2.16	2300	42	9650	2.25	53	52°	34°
5737	19?	—	10	13700	2.90	8	>90	65:
9996	36.5	2000	5	10630	2.57	4	>90	76
10221	3.1848	1400	31	10550	2.55	40	51	33
10783	4.1327	2400	24	9950	2.40	30	53	34
11503	1.61?	1800	62	9850	2.37	74:	57:	36:
12447	0.7383	1800	95	9200:	2.00:	136:	44:	27:
12767	1.9	—	73	9150	1.97	52	>90	79
18296	2.88422	1800	17	10310	2.52	44	23	16
19832	0.7278925	1200	147	12640	2.75	191	50	33
21699	2.4761	1500	59	16400	3.35	68	60	35
22470	1.9	1500	135	13000	2.80	75	>90	>90
24712	12.448	—	6	9150:	1.95:	8:	49:	32:
25267	2.42?	2000	28	11650	2.65	55:	31:	21:
25354	3.9001	1200	17	9880	2.40	31	33	22
25823	7.227?	2000	20	13150	2.80	20:	90:	44:
27309	1.5691?	4600	54	12250	2.70:	87:	38:	20:
30466	1.4	4900	42	10400	2.53	91	27	19
32633	6.431	5100	23	13400	2.85	22	90	46
34452	2.4660	4800	52	15500	3.13	20	>90	>90
37017	0.901175	—	152	22800	4.80	270	35	22
37479	1.190811	—	150	23260	4.90	208	46	29
37776	1.5385	—	150	24000	5.10	167	64	39
40312	3.618	—	50	9770	2.32	32	>90	>90
43819	1.0785	1800	35	10800	2.60	122	17	12
49606	3.099	—	30	13150	2.80	46	41	26
49976	2.976	2000	38	9200	2.00	34	>90	51
51418	5.4379	—	20	11300	2.65	25	53	32
62140	4.2348	—	30	9270	2.05	24	>90	61
64740	1.33016	—	274	23780	5.05	192	>90	87
65339	8.0278	—	20	9110	1.95	12	>90	>90
71866	6.80054	—	17	9360	2.10	16	>90	48
72968	5.57?	1600	15	9690	2.30	21:	46:	30:
74521	5.43?	3500	19	10550	2.56	24:	52:	34:
77653	3.2	1200	0	12800	2.80	44	0	0
78316	5.0035	—	5:	13130	2.80	28	10:	7:
90569	1.4450	1400	11	10100	2.48	87	7	5
98088	5.90513	—	25	8500	1.70	15	>90	>90
108662	5.0754	—	21	9880	2.37	24	61	38
111138	16.31	3000	8	9530	2.22	7	>90	54
112413	5.46939	1800	25	11200	2.63	24	>90	47
118022	3.722	—	17	9450	2.15	29	36	24
119213	2.451	—	35	8550	1.70	35	>90	44
120198	1.37999	1800	40	10130	2.50	92	25	17
124224	0.520677	—	120	11790	2.66	259	28	19
125248	9.2954	2000	14	9200	2.00	11	>90	63
125823	8.8171	—	18	20110	4.23	24	48	38
126515	130	2700	5	9000	1.90	0.7	>90	>90
133029	2.8884	3500	20	11400	2.65	46	26	18
137909	18.487	—	3	8070	1.55	4	45	30
140728	1.30488	1500	79	10000	2.43	94	57	36
142301	1.45955	—	80	16800	3.40	118	43	26
142990	0.98?	—	183	19000	3.95	203:	64:	39:
144334	3.61	—	65	16730	3.40	48	>90	71
148112	1.53	—	30	9640	2.28	75	23	16
152107	3.86	—	34	9010	1.88	25	>90	72
153882	6.0087	2500	26	9100	1.95	16	>90	>90
164429	0.51747	2700	200:	9970	2.40	242:	56:	33:
168733	6.3	1300	0	10100	2.50	20	0	0
170000	1.71646	—	85	11680	2.65	78	>90	50
170397	2.24	—	46	9490	2.17	49	70	41
173650	9.9748	1400	16	9780	2.35	12	>90	69
174933	6.36247	1500	10	12300	2.80	22	27	35
175362	3.682	1800	28	19500	4.10	56	30	20
184905	1.845251	1100	70	9860	2.37	65	>90	49
184927	9.536	—	10	22840	4.80	25	23	16

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

HD	$P$ , дней	$B_g$ , Гс	$v \sin i$ , км/с	$T_e$	$R(V)$	$v$ , км/с	$i$ (V)	$i_0$
188041	223.9	—	3	8700	1.75	0.4	>90	>90
192678	18.20?	5000	6	9200	2.00	6:	90	42:
192913	16.846	1800	14	10000	2.43	7	>90	>90
193722	1.13254	1300	250	12350	2.70	121	>90	>90
196502	20.2754	2000	5	9300	2.05	5	78	43
203006	2.1219	2400	48	9700	2.30	55	61	38
204411	360?	1000	5	8530	1.70	0.3	>90	>90
215038	2.03763	3900	33	13800	2.90	27	>90	59
215441	9.4877	5100	5	15300:	3.10:	16:	18:	13:
220825	0.5805	1400	40	9670	2.57	224	10	7
223640	3.73	2200	42	13770	2.90	39	>90	49
224801	3.73975	1800	54	12400	2.82	38	>90	84

денных к системе температур [8, 9]. Однако недавно вышла серия работ Адельмана, в которых приведены результаты определения  $T_e$  многих пекулярных звезд по распределению энергии в непрерывных спектрах с помощью моделей [10]. Эти модели учитывают блокировку 1 760 000 спектральными линиями и наиболее точно среди известных моделей воспроизводят распределение энергии в непрерывных спектрах нормальных звезд в диапазоне 3200—4700 Å [11]. Распределение энергии в Ар-звездах получено с применением новой калибровки Веги [12]. По-видимому, работы Адельмана [13—23] дают наиболее однородную систему  $T_e$  для пекулярных звезд. Разумеется, для многих Ар-звезд оценки температур будут менее надежными, так как методика их определения не учитывает влияния особенностей химического состава, блокировки спектральными линиями, особенно в ультрафиолетовой области спектра, особенностей структуры атмосфер, переменности распределения энергии и других эффектов. Это проблема будущего, она требует специального изучения.

В табл. 1 приведены температуры, взятые в [7, 24] и приведенные к системе Адельмана [13—23] с помощью зависимостей, построенных по общим звездам, а также температуры, оцененные по показателям цвета в системе  $UBV$ . Если для звезды имелось несколько оценок  $T_e$ , полученных разными авторами и разными способами, вычислялось среднее значение. Такая методика не дает возможности оценить ошибку  $T_e$  для каждой звезды, однако в тех случаях, когда средняя величина находилась из нескольких значений, было видно, что разница между ними редко превышала 1000 К для звезд с  $T_e > 10\ 000$  К и 500 К для звезд с  $T_e < 10\ 000$  К. В среднем можно принять ошибку для первого случая 500 К и для второго — 300 К.

Разброс значений температур определяется не только случайными ошибками, но и переменностью звезд.

**2. Радиусы звезд.** Радиусы можно оценить двумя способами: 1) путем использования  $T_e$  и  $\lg g$ ; 2) по эмпирическим соотношениям  $R(T_e)$  для главной или другой последовательности. Первый способ основан на использовании известной формулы  $R/R_\odot = 8.46 - 0.2 M_{\text{bol}} - 2 \lg T_e$ . Величина  $M_{\text{bol}}$  находится по  $\lg g$  и  $T_e$  по соответствующим таблицам из [25]. Однако низкая точность определения  $\lg g$  и малое число опубликованных данных сводят на нет его достоинства. Второй способ дает достаточно однородные и точные результаты, если надежны  $T_e$  и есть уверенность, что Ар-звезды принадлежат главной или другой последовательности. Мы сделали оценки радиусов двумя способами и затем проанализировали результат.

Оценки  $R$  (в единицах радиуса Солнца) мы сделали по эмпирической зависимости для главной последовательности, приведенной в работе [25], они даны в табл. 1 и обозначены как  $R(V)$ . Для оценок  $R$  по  $T_e$  и  $\lg g$  мы собрали опубликованные в литературе данные, в основном из [9, 13—23, 26]. Приведенные там величины ускорения силы тяжести получены, как правило, путем сравнения наблюдаемого распределения энергии в непрерывных спектрах и в некоторых случаях профилей водородных линий с модельными расчетами. Для определе-

ния  $R$  были тоже использованы эмпирические зависимости из работы [25]. Полученные значения приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

HD	$\lg g$	$R(g)$	HD	$\lg g$	$R(g)$
5737	3.5	7.1	119213	3.5	3.2
9996	3.7	4.7	111133	3.3	5.0
12767	3.75	2.6	124224	3.7	5.0
18296	3.4	7.1	126515	4.0	2.1
25823	3.5	5.6	133029	4.0	3.3
27309	4.0	3.2	137909	3.7	2.7
32633	4.0	3.3	148112	3.5	4.2
34452	4.0	3.3	144334	4.1	3.5
47152	4.0	2.4	147550	4.0	2.1
49606	4.2	2.6	152107	3.8	2.5
62140	4.0	2.3	168733	3.8	4.3
64486	4.0	1.9	170000	4.2	2.6
71866	4.1	2.1	174933	3.7	4.8
72968	3.5	4.0	175362	3.9	4.5
78316	3.55	5.4	204411	3.4	3.5
90569	3.5	4.5	220825	3.8	3.0
108662	4.0	2.5	223640	3.7	5.0
112413	4.0	3.3	224801	3.7	5.0
118022	3.6	3.6			

На рис. 1 сравниваются радиусы Ар-звезд, полученные обоими способами. Здесь совершенно определенно выделяются две зависимости, разделяющие звезды на две группы. Две зависимости могут произойти по трем причинам: 1) если имеются две группы Ар-звезд, одна из которых принадлежит главной последовательности, а другая имеет повышенную светимость (радиусы в 2—2.5 раза больше); 2) если имеются две группы звезд, у которых параметры непрерывного спектра и профили водородных линий резко различаются; 3) если имеются недостатки в методике определения  $T_e$  и  $\lg g$ . Действительно, распределение энергии в непрерывном спектре Ар-звезд аномально [27—28] и профили линий водорода часто более узкие, чем у нормальных звезд той же температуры. Это приводит к уменьшенным значениям  $\lg g$  при их определении. С другой стороны, нет дан-

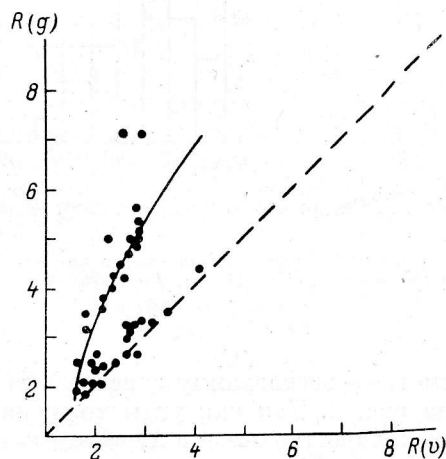


Рис. 1. Соотношение радиусов Ар-звезд, полученных по эмпирической зависимости для главной последовательности и по ускорению силы тяжести.

ных против существующего мнения, что по крайней мере часть Ар-звезд являются звездами с повышенной светимостью. Если внимательно рассмотреть величины  $\lg g$  в табл. 2, то можно заметить, что они преимущественно равны или 4.0, или 3.5. Совершенно очевидно, что авторы при оценках  $T_e$  и  $\lg g$  с помощью опубликованных сеток моделей стремятся в первую очередь совместить наблюдаемые профили с теоретическими для разных  $T_e$  и грубо оценивают  $\lg g$ , не заботясь о промежуточных значениях. Именно для значений  $\lg g = 4.0, 3.5, 3.0$  и т. д. обычно и рассчитываются модели. В результате возникают две ветви  $R(g)$ . Величина  $\lg g < 4.0$  часто получается по распределению энергии в непрерывном спектре из-за уменьшенного бальмеровского скачка [27, 28].

Мы сделали расчет радиусов для  $\lg g = 4.0$  и 3.5 и получили графики, приведенные на рис. 1 сплошной линией. При этом предполагалось, что  $\lg g = 4.0$

соответствует главной последовательности  $R(V)$ . Полученные графики хорошо представляют зависимости, которые мы обсуждаем.

Таким образом, можно считать, что применение эмпирической зависимости  $R(T_e)$  для главной последовательности (см. также § 3) дает более правильные значения радиусов, чем использование  $\lg g$ .

**3. Наклон осей вращения Ар-звезд.** На основании известных величин  $P$  и определенных нами  $R(V)$  мы оценили экваториальные скорости вращения  $v = 50.6R/P$  и затем углы наклона  $i$  из известных  $v \sin i$ , приведенных в табл. 1. На основании полученных углов можно сделать ряд интересных выводов. Рас-

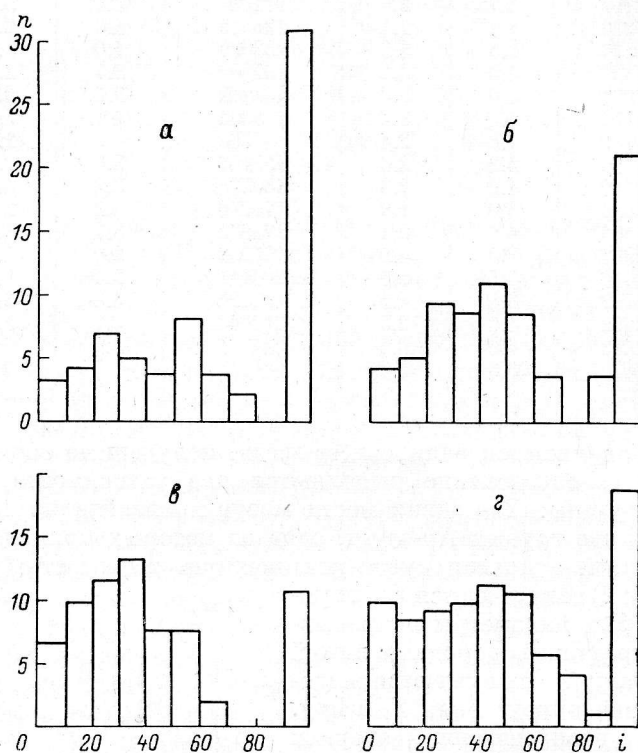


Рис. 2. Гистограммы распределения количества звезд Ар с разным наклоном  $i$  оси вращения к лучу зрения.

$a$  — предположение принадлежности Ар-звезд к главной последовательности;  $б$  — то же, к IV классу светимости;  $в$  — то же, к III классу светимости;  $г$  — теоретическое распределение с учетом влияния ошибок на  $v \sin i$ .

смотрим гистограмму зависимости количества звезд  $n$  от угла  $i$ , приведенную на рис. 2. Так как углы вращения направлены в пространстве произвольно, то количество звезд в промежутках  $i = 0 \div 10^\circ$ ,  $10 \div 20^\circ$  и т. д. должно быть одинаковым. На самом деле, как это видно на рис. 2,  $a$ , мы наблюдаем широкий максимум на  $i \approx 20 \div 60^\circ$ , а также при  $i > 90^\circ$ . Угол  $i > 90^\circ$  мы условно считаем в тех случаях, когда  $\sin i > 1$ . Такая ситуация может возникать тогда, когда слишком малы  $R$  или очень велики  $v \sin i$ . Предположим первое и сделаем оценки  $R$  по зависимости  $R(T_e)$  для звезд IV и III классов светимости. Гистограммы, полученные при таких предположениях, приведены на рис. 2,  $б$  и  $в$ . Действительно, число звезд с  $i > 90^\circ$  уменьшилось, но при этом увеличился максимум в середине интервала, и он сдвинулся влево в сторону малых значений  $i$ . Кроме того, еще более увеличился свободный промежуток в диапазоне  $i \approx 70 \div 90^\circ$ . Таким образом, неравномерность распределения звезд в диапазоне  $i = 0 \div 90^\circ$  с увеличением  $R$  растет. В связи с этим создается впечатление, что предположение о принадлежности Ар-звезд к главной последовательности и, может быть, части из них к IV классу светимости более правильно, чем к звездам более высокой светимости.

Однако необходимо объяснить избыток звезд с  $i > 90^\circ$ . В связи с этим рассмотрим вторую возможную причину — значения  $v \sin i$ , приводимые в литературе, аномально велики. Чтобы «вернуть» звезду из области  $i > 90^\circ$  в область  $i \approx 70 \div 80^\circ$  на рис. 2, а, необходимо из  $v \sin i$  вычесть некоторую величину  $\Delta$ . Оказалось, что  $\Delta$  зависит от  $v \sin i$  таким образом:

$$\Delta = 0.32v \sin i - 1.4,$$

а коэффициент корреляции  $k = 0.839 \pm 0.054$ . Это означает, что значения  $v \sin i$  в среднем увеличены на 30%. Неясно однако, все ли они увеличены на такую величину или только те, которые имеют  $\sin i > 1$ . Когда мы построили гистограммы для двух случаев: 1) уменьшены на 30% только те значения  $v \sin i$ , которые дают  $\sin i > 1$ ; 2) на 30% уменьшены все значения  $v \sin i$ , — то было видно, что в обоих случаях количество звезд с  $i > 90^\circ$  резко уменьшилось. Во втором случае уменьшился недостаток звезд с малыми  $i$ , но вырос максимум на  $i \approx 30 \div 40^\circ$ . Трудно отдать предпочтение тому или другому варианту, однако второй нам кажется физичнее. Мы предполагаем, что по какой-то причине все Ар-звезды имеют увеличенные скорости вращения в среднем на 30%.

Увеличение значений  $v \sin i$  у Ар-звезд пока является непонятным. Единственный эффект, который никогда не учитывался при их определении, это уширение спектральных линий магнитным полем. Поверхностное магнитное поле пекулярных звезд, по-видимому, в среднем составляет величину 4—5 кГс, следовательно, расширение спектральных линий равно  $\sim 0.2 \text{ \AA}$ , или  $\sim 20 \text{ км/с}$ . Престон отмечал [29], что изучение спектра  $\beta$ СтВ сразу показало, что зеемановский эффект является преобладающим фактором расширения линий и что предыдущие оценки  $v \sin i$  были слишком велики. Но магнитное расширение линий зависит от скорости вращения, кроме того, его влиянию сильнее подвержены малые значения  $v \sin i$  ( $< 30 \text{ км/с}$ ). С другой стороны, ошибки определения  $v \sin i$  тем больше, чем шире линия. Возможно, оба эффекта играют роль, однако окончательно этот вопрос может быть решен только после специального его изучения. Следует учесть, что во многих случаях оценки делались по спектрам, имеющим слишком малую дисперсию. В частности, на избыток звезд  $i > 90^\circ$  и образование недостатка звезд в области  $i < 90^\circ$  на рис. 2 может влиять и следующая причина. Пусть в нашем распоряжении имеется некоторое количество звезд, распределенных равномерно во всех промежутках  $i$ , тогда, исходя из средней скорости вращения Ар-звезд  $v \sin i = 30 \text{ км/с}$ , можно вычислить углы  $i$  при предположении, что максимальная ошибка равна 10 км/с и ошибки  $\sigma$  распределены как

$$v \sin i \pm \sigma,$$

где  $\sigma = 1, 2, \dots, 10 \text{ км/с}$ . Разумеется, ошибки могут быть и больше, и меньше, и распределение их случайно, но качественно картина от этого не изменится.

На рис. 2, г приведена гистограмма, полученная таким способом. Оказывается, что для звезд, имеющих  $i < 40 \div 50^\circ$ , изменение  $v \sin i$  на  $\pm 10 \text{ км/с}$  оставляет звезду в том же или близком диапазоне углов  $i$  и величина  $n$  при этом не изменится. Другое дело, когда звезда попадает в область  $i > 50^\circ$ , где происходит быстрое изменение  $\sin i$ . Здесь уже небольшая ошибка существенно меняет угол, вследствие чего одна часть звезд попадает в область  $\sin i > 1$ , делая избыток на  $i > 90^\circ$ , а другая попадает в диапазон  $i = 40 \div 70^\circ$ . Увеличивая ошибку  $\sigma$ , можно увеличить избыток звезд в рассматриваемых диапазонах. Малое число звезд на рис. 2 с  $i = 0 \div 10^\circ$ , возможно, связано, с тем, что часть звезд с такими углами наклона имеет полюса магнитного поля вблизи экватора ( $\beta = 90^\circ$ ), а поле в таких случаях необнаружимо.

**4. Ориентация диполей.** Исходя из простейшей модели магнитного поля в виде центрального диполя, мы рассчитали углы наклона оси диполя к оси вращения по известной формуле [29]

$$\operatorname{tg} \beta = \left( \frac{1-r}{1+r} \right) \operatorname{ctg} i.$$

При этом мы использовали те значения углов  $i$ , которые были получены с  $v \sin i$ , уменьшенными на 30 %. Величины

$$r = B_e(\min)/B_e(\max)$$

приведены в табл. 3. Они определяются по кривым изменения магнитного поля  $B_e$ , опубликованным в литературе ( $r_\phi$  — величины, определенные по фотогра-

ТАБЛИЦА 3

Параметры магнитного поля

HD	$r_\phi$	$r_\alpha$	$\beta_\phi$	$\beta_\alpha$	$B'_s(\Phi)$	$B'_s(\alpha)$
5737	—	-0.95	—	87:	—	940:
12447	-0.88	—	87	—	1800:	—
12767	-1.00	—	90	—	550	—
24712	+0.23	—	45:	—	2780:	—
19832	-0.73	—	84	—	1470	—
25267	+0.05	—	67:	—	1160	—
32633	-0.67	-0.34	77	63	11400	19200
34452	-0.44	—	0	—	—	—
37017	—	-0.08	72	—	—	6000
37479	—	-0.80	—	86	—	10800
37776	—	-0.22:	—	38:	—	2320 :
40312	-0.86	—	0	—	—	—
49606	-0.54	—	80	—	7560	—
49976	-0.87	—	4	—	5800	—
51418	-0.50	—	78	—	18300	—
62140	-0.93	—	86	—	3480	—
64740	—	-0.53	—	10	—	6840
65339	-0.69	—	0	—	—	—
71866	-0.86	—	85	—	7300	—
78316	-0.60	—	88:	—	7170	—
98888	-0.82	—	0	—	—	—
108662	-1.00	+0.2	90	40	1560	2660
111133	+0.18	—	27	—	3300	—
112413	-0.86	—	85	—	3890	—
118022	+0.37	+0.1	46	61	3660	2390
119213	-0.78	—	83	—	2420	—
125248	-0.83	-0.93	80	86	4600	6560
124224	—	-0.81	—	88	—	3560
126515	+0.75	—	0	—	—	—
125823	-0.56	—	14	—	1953	—
133029	+0.62	+0.55	36	42	5320	9600
137909	-0.80	-0.43	86:	77:	2660:	2490:
142301	—	-0.41	—	78	—	20000
142990	—	-0.32	—	67:	—	4540
148112	+0.33	—	60	—	870	—
144334	—	-0.40	—	39	—	3050
152107	+0.77	+0.21	2	12	10200	10370
153882	-0.46	-0.89	0	0	—	—
170000	-0.38	—	62	—	1100	—
170397	-0.86	—	86	—	2250	—
175362	-0.85	-0.74	88	87	37100	34200
184927	—	0.00	—	74	—	17400
188041	-0.5:	—	3:	—	—	—
196502	-1.00	—	90	—	1700	—
215441	+0.61	+0.57	46:	50:	27500:	52000:

фическим наблюдениям, а  $r_\alpha$  — по фотоэлектрическим). Вычисленные нами углы приведены в табл. 3, а гистограмма распределения количества звезд с разными  $\beta$  приведена на рис. 3, а. Она имеет два максимума на  $\beta=0 \div 10$  и  $80 \div 90^\circ$ . Эти максимумы также легко интерпретируются ошибками  $v \sin i$ . Задавая ошибку  $\pm 10$  км/с, мы получили гистограмму, приведенную на рис. 3, б. Для простоты вычисления проведены только для  $r=\pm 0.5$ . Эти максимумы возникают ввиду быстрого изменения зависимости  $\beta(i)$  в крайних диапазонах  $\beta$ . Немного больший правый максимум на гистограмме рис. 3, а может получиться случайно из-за небольшого числа данных и в том случае, если величина избытка  $v \sin i$  равна не 30 %, а на несколько процентов меньше.

На гистограмме рис. 3, *a* не видно тенденции к преимущественной ориентации диполей в Ар-звездах. Если воспользоваться вероятностным методом Престона [29], то можно получить данные, не противоречащие этому выводу. Для набора звезд с магнитным наклоном  $\beta$  и произвольным наклоном их осей вращения к лучу зрения вероятность наблюдения  $r$  в промежутке  $dr$

$$p = \frac{2(1-r)\operatorname{tg}\beta}{[(1-r)^2 + (1+r)^2 \operatorname{tg}^2\beta]^{3/2}}.$$

На рис. 4 приведена гистограмма количества звезд  $n$  с разными  $r$ . (По сравнению с работой Престона [29] мы собрали больше данных). Сплошной линией на графике показано распределение звезд при произвольной ориентации дипо-

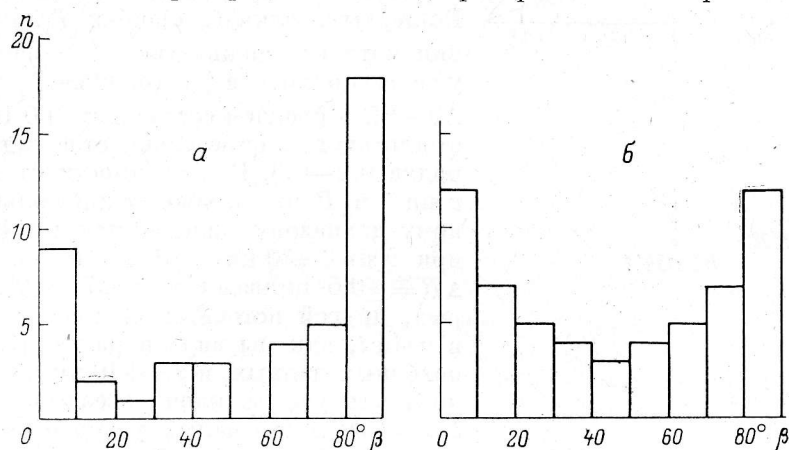


Рис. 3. Гистограмма распределения количества Ар-звезд с разным наклоном  $\beta$  оси диполя к оси вращения.

*a* — наблюдаемое распределение; *b* — теоретическое распределение с учетом влияния ошибок на  $v \sin i$ .

лей, а штриховой — распределение Престона (50 % звезд имеют  $\beta = 80^\circ$  и 50 % —  $\beta = 20^\circ$ ). Обе кривые проведены так, чтобы величина

$$\Delta n = \sqrt{\frac{\sum (n_{iн} - n_{iп})^2}{n - 1}}$$

была минимальной. Здесь  $n_n - n_n$  — отклонение наблюдаемых значений  $n_n$  от кривых в соответствующих промежутках  $\Delta r$ . При этом оказалось, что в случае произвольной ориентации диполей  $\Delta n = 2.16$ , а для распределения Престона  $\Delta n = 1.94$ , т. е. оба случая согласуются с наблюдениями в одинаковой степени. По-видимому, по мере накопления данных и увеличения статистики тенденция к преимущественной ориентации диполей будет уменьшаться.

**5. Поверхностное магнитное поле.** На основании вычисленных нами углов  $i$  и  $\beta$  мы оценили поверхностное магнитное поле  $B'_s$  по формуле из [1]

$$B'_s = \frac{0.667B_e(\min, \max)}{0.32 \cos(i \pm \beta)}.$$

Значения  $B'_s$ , вычисленные отдельно по фотографическим и фотоэлектрическим наблюдениям, приведены в табл. 3. К сожалению, из всех звезд, для которых известны кривые изменения магнитного поля, только 15 содержатся в списке Крамера и Мидера [2], причем три из них имеют  $\sin i > 1$ . На рис. 5 значения  $B'_s$  отложены в зависимости от предполагаемых  $B_s$ . Здесь же отложены знаком  $\mathcal{E}$  данные Штифта [30]. Так же как и в [1], отчетливо видно, что  $B'_s > B_s$ , причем зависимость между ними весьма слабая:  $B'_s = 2.12B_s - 0.91$  при коэффициенте корреляции  $k = 0.65$ .

К сожалению, имелось слишком мало общих звезд в нашем списке и списке Престона [6], на основании которого построен график для определения  $B_s$  [2].



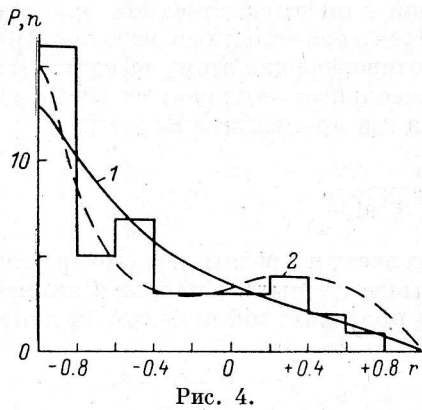


Рис. 4.

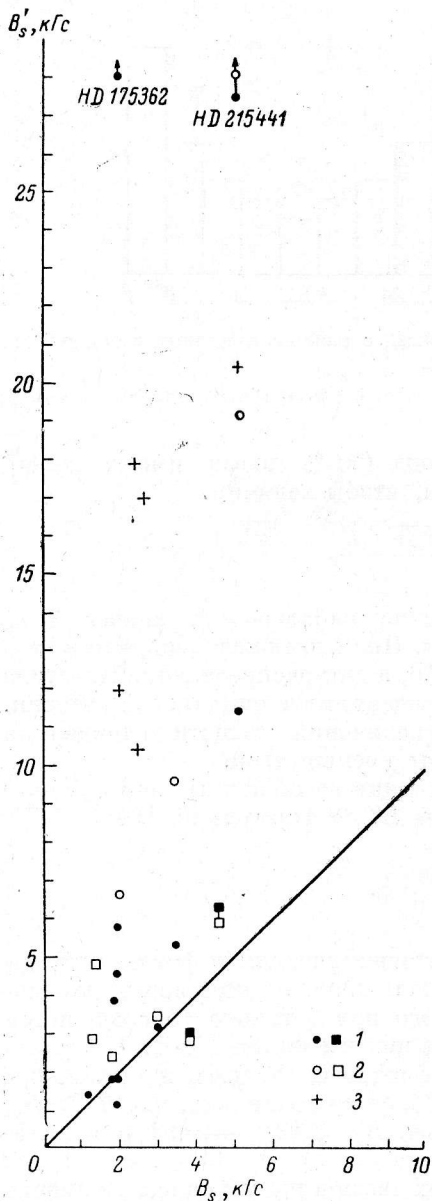


Рис. 5.

Из общих звезд четыре имеют практически одинаковые значения поверхностного поля, а пятая —  $\beta$ CrV — слишком неопределенное значение  $v \sin i \leq 3$  км/с, в результате чего наше значение  $B'_s$  является ненадежным. Следует отметить, что исправление  $v \sin i$  на 30 % мало изменило зависимость  $B'_s$  ( $B_s$ ), но существенно уменьшило число звезд с  $\sin i > 1$ .

Оценим влияние ошибок используемых параметров на вычисленные значения  $B'_s$ . Во-первых, влияют ошибки  $T_e$ , на основании которых оцениваются  $R$  и затем  $i$ . Как уже говорилось в § 2, ошибка  $T_e$  для звезд A0—B8 в среднем составляет 500 К, что соответствует неопределенности радиуса порядка 0.2—0.3. В зависимости от величины  $v \sin i$  и  $P$  это приводит к довольно широкому диапазону ошибок угла  $i$ . В среднем при  $v \sin i = 30$  км/с,  $P = 4^d$  и  $R = 3$  ошибка  $\Delta R = \pm 0.5$  приведет к  $i = 57^\circ \pm 10^\circ$ . Во-вторых, другой источник ошибок содержится в  $v \sin i$ , как мы видели ранее. При тех же исходных данных и  $\sigma = \pm 10$  км/с мы можем получить угол наклона звезды в диапазоне  $i = 35 \div 90^\circ$ . Для малых углов ошибка меньше, для больших — больше. Таким образом, при оценках  $i$  мы можем говорить только о его порядке, имея в виду неопределенность существующих значений  $v \sin i$ . Относительные изменения  $B'_s$  в зависимости от  $i$  в среднем характеризуются кривыми, приведенными на рис. 6. Эти кривые построены для  $r = \pm 0.5$ . Из рис. 6 видно, что при изменении  $i$  в пределах  $25 \div 65^\circ$  величина  $B'_s$  изменяется не более чем в 1.5 раза. В диапазонах  $i = 0 \div 25$  и  $65 \div 90^\circ$  ошибка угла  $i$  может вызывать большие отклонения величины  $B'_s$ . Это приведет к тому, что многие значения  $B'_s$  будут завышены. Однако только этой причиной неравенство  $B'_s > B_s$  не может быть объяснено, так как разброс должен быть в обе стороны, несмотря на тенденцию к увеличению  $B'_s$ . Как видно из рис. 5, точек, лежащих ниже прямой линии, практически нет.

Рис. 4. Гистограмма распределения количества Ар-звезд с разными  $r$ .

1 — теоретическое распределение при произвольной ориентации осей вращения; 2 — теоретическое распределение при соотношении Престона: 50 % звезд имеют  $|\beta| = 80^\circ$  и 50 % с  $\beta = 20^\circ$ .

Рис. 5. Соотношение между  $B'_s$  и  $B_s$ .

1 — оценки по фотографическим измерениям  $B'_s$  в данной работе и в [1] соответственно; 2 — оценки по фотоэлектрическим измерениям  $B'_s$  в данной работе и в [1] соответственно; 3 — данные из работы [30].

Внимательное изучение факторов, влияющих на  $B'_s$ , показывает, что ошибка может достигать 50—100 %, в основном из-за неопределенности  $v \sin i$ .

**6. Заключение.** На основании представленного выше материала можно сделать следующие выводы.

1. Все еще не существует надежных оценок эффективных температур для большей части Ар-звезд. Это обстоятельство крайне затрудняет всякого рода статистические исследования, а применение существующих оценок температур делает результаты недостаточно надежными.

2. Приводимые во многих источниках оценки скоростей вращения отягощены значительными систематическими ошибками. Необходима разработка

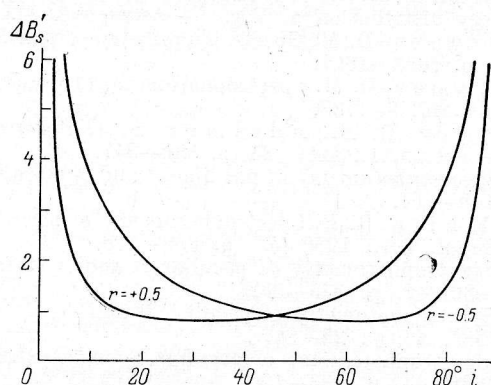


Рис. 6. Относительные изменения  $\Delta B'_s$  вычисленного поверхностного поля при изменении угла  $i$ .

достаточно точных методов определения скоростей вращения и применения спектрограмм высокого разрешения.

3. Вопрос о положении Ар-звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рессела до сих пор недостаточно ясен. Эта проблема крайне важна для физики и эволюции Ар-звезд. Желательны точные оценки ускорения силы тяжести на поверхности Ар-звезд с учетом влияния спектральных особенностей.

4. Ориентация диполей относительно осей вращения, по-видимому, произвольна. Если тенденция к ортогональности и существует, то для небольшой части звезд. Этот вопрос имеет принципиальное значение в проблеме изучения механизмов образования магнитного поля.

5. Среднее поверхностное магнитное поле Ар-звезд, оцененное на основе предположения центрального диполя, систематически больше значений, предполагаемых на основе свойств многоцветной женеvской фотометрии. Нет четкой зависимости между значениями поля на поверхности, определенного этими двумя способами, вероятно из-за значительных ошибок.

6. Необходима разработка новых и усовершенствование существующих способов оценки поверхностных магнитных полей звезд, имея в виду, что именно поверхностное поле определяет физическое состояние поверхностных слоев атмосфер. Поиск различных зависимостей параметров следует искать именно от поверхностного магнитного поля.

#### Литература

1. Исследование средних поверхностных магнитных полей Ар-звезд / Ю. В. Глаголевский, В. Д. Бычков, И. И. Романюк, Н. М. Чунакова. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1985, 19, с. 28—36.
2. S r a m e r N., M a e d e r A. Catalogue of photometric data related to surface magnetic fields for B-type stars. — *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1980, 41, p. 111—115.
3. A b t H. A., C h a f f e e F. H., S u f f o l k G. Rotational velocities of Ap-stars. — *Astrophys. J.*, 1972, 175, p. 779—786.
4. U e s u g i A., F u c u d a I. A catalogue of rotational velocities of the stars. — *Contr. Inst. Astrophys. and Kwasan Observ. Univ. Kyoto*, 1970, N 189, p. 205—250.
5. B e r n a c c a P. L., P e r i n o t t o M. A catalog of stellar rotational velocities. — *Contr. Observ. Astroph. Univ. Padova*, 1970, N 239.
6. P r e s t o n G. The mean surface fields of magnetic stars. — *Astrophys. J.*, 1971, 164, p. 309—315.

7. Глаголевский Ю. В., Козлова К. И., Чунакова Н. М. Об эффективных температурах пекулярных и металлических звезд. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1973, 5, с. 52—69.
8. Wolff S. C., Kuhl L. V., Hayes D. The effective temperatures of A and B stars. — *Astrophys. J.*, 1968, 152, p. 871—884.
9. Jugaku J., Sargent W. L. W. Studies of the peculiar A-stars. V. — *Astrophys. J.*, 1968, 151, p. 259—268.
10. Kurucz R. L., Reutemann E., Avrett E. H. Blanketed model stellar atmospheres. Washington, NASA, SP-3065, 1971.
11. Спектрофотометрия ярких звезд / Под ред. И. Н. Глушневой. М.: Наука, 1982.
12. Hayes D. S., Latham D. W. A rediscussion of the atmospheric extinction and the absolute spectral-energy distribution of Vega. — *Astrophys. J.*, 1975, 197, p. 593—602.
13. Adelman S. J., Puper D. M. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. II. — *Astron. J.*, 1979, 84, p. 1603—1611.
14. Adelman S. J., Puper D. M. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. III. — *Astron. J.*, 1979, 84, p. 1726—1738.
15. White R. E., Puper D. M., Adelman S. J. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. IV. — *Astron. J.*, 1980, 85, p. 836—847.
16. Adelman S. J. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. V. — *Astron. and Astrophys.*, 1980, 86, p. 149—154.
17. Adelman S. J., White R. E. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. VI. — *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1980, 42, p. 289—298.
18. Adelman S. J. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. VII. — *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1980, 42, p. 375—382.
19. Adelman S. J. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. VIII. — *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1981, 43, p. 25—31.
20. Adelman S. J. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. IX. — *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1981, 43, p. 183—190.
21. Adelman S. J. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. X. — *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1981, 44, p. 265—272.
22. Adelman S. J. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. XI. — *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1981, 44, p. 309—316.
23. Adelman S. J. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. XII. — *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1982, 49, p. 663—672.
24. Babu G. S. D., Shylaja B. S. A compilation of physical parameters of Ap and Am stars as determined from energy distribution studies. — *Astrophys. Sp. Sci.*, 1981, 71, p. 243—255.
25. Straizis V., Kuriliene G. Fundamental stellar parameters derived from the evolutionary tracks. — *Astrophys. and Sp. Sci.*, 1981, 80, p. 353—368.
26. Michalas D., Henshaw J. L. Studies of the peculiar A stars. — *Astrophys. J.*, 1966, 144, p. 25—58.
27. Глаголевский Ю. В. Некоторые результаты наблюдений непрерывных спектров магнитных звезд. — *Астрон. ж.*, 1966, 43, с. 73—79.
28. Носк В. The photometric properties of the Ap-stars. — *IAU Coll. No. 32*, Vienna, 1975, p. 365—378.
29. Preston G. Surface characteristic of the magnetic stars. — *PASP*, 1971, 83, p. 571—584.
30. Stift M. J. Photometric investigations of magnetic stars. — *Astron. and Astrophys.*, 1973, 22, p. 209—215.

Поступила в редакцию 25 апреля 1983