

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕКУЛЯРНОСТЕЙ В СПЕКТРАХ ЗВЕЗД Ap

В. В. Лушин

На основе количественной спектральной классификации звезд Ap проведено определение количественных характеристик пекулярности их спектров. Последние сопоставлялись со спектральным классом, напряженностью магнитного поля, бальмеровским скачком, а также между собой. Из этих сопоставлений сделаны следующие выводы: 1) пекулярность плавно нарастает при переходе от нормальных звезд к пекулярным, 2) «степень пекулярности» коррелирует с величиной магнитного поля и бальмеровского скачка.

Quantitative characteristics of peculiarities in the spectra of Ap stars have been determined on the basis of their quantitative spectral classification. The characteristics are compared with the spectral class, magnetic field strength, Balmer discontinuity, and with each other. From these comparisons the following conclusions are drawn: 1) the peculiarity continuously increases in passing from normal stars to peculiar ones; 2) the «degree of peculiarity» correlates with the magnetic field strength and the Balmer discontinuity.

§ 1. ВВЕДЕНИЕ

Пекулярные звезды спектрального класса A делят на ряд групп по пекулярности их спектров. Однако это разделение до сих пор производилось качественно, глазомерным способом, без определения каких-либо количественных критериев пекулярности. Поэтому попытки изучения этих пекулярностей и выявления их связи с различными характеристиками звезд класса A не дали пока существенных результатов. Ввиду этого разработка количественных методов определения характеристик пекулярности спектров звезд Ap становится очень важной задачей.

В данной работе предпринята попытка определения и изучения количественных характеристик пекулярности спектров звезд Ap. Спектрографический материал, используемый для этой цели, описан в [1]. Эквивалентные ширины линий W_λ (в Å), необходимые для нашей задачи, приведены в табл. 1. Были измерены спектральные линии Si, Mn, Cr, Sr, Y, Hg, Ga, P и редкоземельных элементов (Eu, Ce, Sm, La, Gd), т. е. практически всех «пекулярных» элементов (линии Kг и Хе, интенсивности которых усилены в некоторых звездах Ap, нами не измерялись). Кроме перечисленных, нами измерены линии Sc, Co и Mg, интенсивности которых обычно нормальны в пекулярных звездах Ap. Для измерения выбирались две-три наиболее сильные линии каждого элемента. Но и они редко имеют $W_\lambda > 0.1-0.2 \text{ Å}$, т. е. находятся на пределе обнаружения по спектрограммам с дисперсией 15 Å/мм . Необходимо отметить, что часто наибольший вклад в измеренную эквивалентную ширину давала не линия исследуемого элемента, а другие линии бленды (обычно линии Fe, Ti, Mn, Cr). Это в особенности относится к слабым линиям редкоземельных элементов. Ниже рассматривается поведение каждого элемента из табл. 1 в пекулярных звездах.

Т А Б Л И Ц А 1 (продолжение)

№ п/п	Звезда	Номер по HD	Sp	YII		HgII	GaII		PII		EuII		CeII	SmII		LaII	GdII		ScII		CoI		MgII	
				3950	3984		4262	4251	4172	4475	4414	4205		4129	3930		4289	4433	4041	4287	4391	4132		4415
1	α Hya	83754	B3.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.32
2	ι Aql	184930	B5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.41
3	28 Vul	196740	B3.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.33
4	HR 5880	138764	B6.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.56
5	38 Aql	210424	B5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.35
6	β Tau	35497	B8.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.19
7	ζ Tau	21364	B7.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.48
8	87 Psc	7374	A0.9	—	0.11	0.09	0.11	0.08	—	—	—	—	0.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.51
9	γ Tau	23630	B6.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.28
10	α Cnc	78316	B9.7	—	0.10	0.05	0.03	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.26
11	ρ Lep	33904	B9.3	0.05	0.13	0.08	0.07	—	—	—	0.06	—	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.37
12	α And	358	B9.6	0.03	0.08	0.09	0.15	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.31
13	21 Aql	179761	B9.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.32
14	4 Cyg	183056	B9.9	—	—	—	—	0.03	—	—	0.04	0.06	0.05	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.29
15	γ Crv	10625	B9.4	—	—	—	—	0.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.23
16	ρ Oph	159975	B7.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.34
17	δ Cyg	186882	B8.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.33
18	π Boo	129274	B9.8	0.09	0.17	0.13	0.11	0.10	—	—	0.09	—	—	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38
19	112 Her	174933	A0.3	0.03	0.09	—	0.09	0.08	0.08	—	0.07	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.27
20	CU Vir	124224	B7.2	—	0.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.47
21	θ Aur	40312	A1.0	0.02	0.13	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.21
22	α Dra	123299	A0.2	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.52
23	α Cep	192907	B9.9	—	—	—	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.51
24	α Lyr	172167	A0.1	—	—	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.41
25	138 Tau	39317	A0.3	—	0.07	0.16	0.10	0.14	0.05	0.10	0.08	—	0.08	0.10	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	0.41
26	α CVn	112413	A0.2	0.06	0.05	0.15	0.04	0.11	0.07	0.06	0.11	0.14	0.10	0.10	0.03	0.02	0.06	0.04	0.11	—	—	—	—	0.23
27	29 Vul	196724	A0.2	—	—	0.09	0.05	0.07	0.06	—	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.45
28	α Peg	218045	B9.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38

Т А Б Л И Ц А 1 (продолжение)

№ п/п	Звезда	Номер по HD	Sp	Si I		Si II					Mn II		Cr I	Cr II					Sr II		Y II							
				3905	4200	4131	4128	3862	3856	3854	4282	4206		4137	4254	4559	4275	4262	4242	4111	4012	4215	4162	4077	4309	4177		
29	γ Oph	161868	B9.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
30	α CMa	48915	A0.2	0.10	0.02	0.12	0.17	0.09	0.17	0.06	0.04	0.02	0.02	0.05	0.11	0.04	0.06	0.07	—	0.09	0.10	—	—	—	—	—	—	—
31	63 And	14392	B8.7	0.05	0.15	0.31	0.34	0.12	0.16	0.08	—	—	—	—	—	0.07	—	0.08	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	ι CrB	143807	B9.3	0.06	—	0.12	0.10	0.07	0.15	—	0.03	—	—	—	—	0.03	—	0.04	0.04	0.06	0.04	0.02	0.06	—	—	—	—	—
33	CX Ari	19832	B9.5	0.13	0.15	0.38	0.29	0.20	0.17	0.10	—	—	—	—	—	—	0.04	0.05	0.08	0.07	—	0.24	—	—	—	—	—	—
34	43 Cas	10221	A1.2	0.25	0.12	0.39	0.38	0.28	0.39	0.14	0.10	0.12	0.12	0.08	0.19	0.07	0.14	0.11	0.19	0.24	0.13	0.37	—	—	—	—	—	—
35	30 UMa	89822	A1.0	0.12	—	0.19	0.22	0.13	0.26	0.10	—	—	—	—	—	0.15	0.09	0.10	0.13	0.05	0.12	0.16	0.10	0.30	0.09	0.18	—	—
36	53 Aur	47152	A0.3	0.09	—	0.15	0.16	0.05	0.02	0.02	—	—	—	—	—	0.09	0.09	—	—	—	0.09	0.12	0.08	0.16	—	—	—	—
37	45 Her	151525	A1.0	0.22	0.11	0.22	0.40	0.12	0.24	0.10	0.14	0.13	0.08	0.17	—	0.18	0.05	0.19	0.08	0.12	0.12	0.13	0.23	—	—	—	—	—
38	27 Aur	38104	A2.5	0.20	0.06	0.08	0.23	0.06	0.24	0.07	0.09	—	0.09	0.15	0.24	0.22	0.18	0.17	—	0.11	0.21	0.16	0.16	0.21	0.19	—	—	—
39	HR 6326	153882	A7.3	0.41	—	0.29	0.84	0.16	0.50	0.33	0.14	0.22	0.15	0.29	—	0.20	0.27	0.22	0.26	0.26	0.32	0.31	0.30	0.23	0.25	—	—	—
40	17 Com	108662	A1.0	0.16	0.06	0.11	0.19	0.13	—	—	0.09	0.10	0.07	0.16	0.49	0.13	0.21	0.16	0.22	0.18	0.21	0.19	0.16	0.07	0.10	—	—	—
41	HR 465	9996	A0.5	0.14	0.06	0.18	0.27	0.16	0.20	0.10	0.08	0.05	0.05	0.13	0.17	0.11	0.13	0.13	0.16	0.17	0.20	0.11	0.16	0.05	0.06	—	—	—
42	HR 7058	173650	A0.4	0.14	0.12	0.32	0.36	0.17	0.22	0.06	0.05	0.06	0.06	0.10	0.19	0.07	0.14	0.08	0.08	0.13	0.16	0.07	0.19	0.04	0.09	—	—	—
43	HR 234	4778	A1.7	0.21	0.08	0.07	0.21	0.06	0.15	0.09	0.11	0.12	0.10	0.10	0.23	0.15	0.23	0.19	0.23	0.23	0.33	0.16	0.30	0.07	0.12	—	—	—
44	41 Tau	25823	B9.5	0.06	0.10	0.21	0.17	0.13	0.16	0.07	0.02	—	—	0.03	0.05	0.05	0.09	0.03	—	0.07	0.05	0.03	0.05	0.02	0.05	—	—	—
45	HR 2534	49976	A0.6	0.04	—	—	0.17	0.05	0.10	0.05	0.03	0.07	0.03	0.09	0.29	0.05	0.09	0.09	—	0.13	0.19	0.13	0.13	0.06	0.06	—	—	—
46	γ Gem	47105	A1.1	0.10	0.09	0.15	0.11	0.12	0.18	0.07	0.03	—	0.03	0.05	0.13	0.05	0.07	0.09	—	0.10	0.09	—	0.08	—	0.07	—	—	—
47	β UMa	95418	A2.8	0.16	—	0.15	0.17	0.16	0.25	0.09	0.07	0.05	—	0.07	0.18	0.08	0.06	0.08	—	0.10	0.16	—	0.20	—	0.14	—	—	—
48	θ Vir	114330	A1.0	0.11	—	0.10	0.10	0.15	0.17	—	0.06	—	—	0.06	0.14	0.07	0.05	0.07	—	0.08	0.10	0.06	0.11	0.04	0.07	—	—	—
49	θ Leo	97633	A1.3	0.10	—	0.13	0.17	0.12	0.26	0.08	0.05	—	—	0.05	—	0.04	0.05	0.07	—	0.07	0.15	0.04	0.19	—	0.10	—	—	—
50	HR 8216	204411	A1.8	0.08	—	0.10	0.18	0.09	0.16	0.10	0.11	0.10	—	0.12	0.21	0.07	0.12	0.10	—	0.11	0.18	0.11	0.16	0.08	0.10	—	—	—
51	HR 4876	110066	A3.7	0.21	0.12	0.29	0.35	0.36	0.41	0.42	0.16	0.29	0.11	0.31	0.50	0.20	0.27	0.27	0.33	0.29	0.30	0.34	0.68	0.10	0.26	—	—	—
52	78 Vir	118022	A2.5	0.12	0.09	0.10	0.20	0.07	0.24	0.23	0.16	0.15	0.10	0.29	0.40	0.16	0.23	0.23	0.17	0.17	0.39	0.24	0.40	0.15	0.15	—	—	—
53	73 Dra	196502	A2.8	0.11	0.11	0.30	0.22	0.08	0.25	0.19	0.10	0.17	0.10	0.25	0.37	0.19	0.27	0.32	0.23	0.22	0.61	0.30	0.48	0.21	0.31	—	—	—
54	η Vir	107259	A1.4	0.08	—	0.13	0.13	0.13	0.21	0.13	0.02	0.05	0.04	0.05	0.17	0.04	0.04	0.05	0.05	0.13	0.16	0.09	0.19	0.04	0.12	—	—	—
55	HR 7575	188041	A3.6	0.21	0.12	0.32	0.54	0.13	0.41	0.22	0.25	0.18	0.15	0.23	0.51	0.17	0.20	0.21	0.38	0.23	0.73	0.30	0.78	0.09	0.16	—	—	—
56	ω Her	148142	A0.2	—	—	0.04	0.14	—	0.08	—	0.04	0.06	0.05	0.10	0.11	0.04	0.05	0.05	0.05	0.09	0.10	0.07	0.10	0.05	0.05	—	—	—

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

№ п/п	Звезда	Homep по HD	Sp	YII		HgII		GaII		PII		EuII		CeII		SmII		LaII		GdII		ScII		CoI		MgII		
				3950	3984	4262	4251	4172	4475	4414	4205	4129	3930	4289	4433	4041	4287	4391	4132	4415	4314	4247	4119	3845	4481			
29	γ Oph	161868	B9.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.55		
30	α CMa	48915	A0.2	0.02	—	0.06	0.07	0.05	—	—	—	0.02	—	0.05	0.10	0.04	0.02	0.02	—	—	—	0.07	0.04	0.04	0.03	0.04	—	0.44
31	β And	14392	B8.7	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.28	
32	ι CrB	143807	B9.3	0.04	0.04	—	0.03	—	—	—	—	0.04	0.02	0.03	—	—	0.01	—	—	—	0.07	0.02	—	0.05	0.03	0.03	—	0.38
33	CX Ari	19832	B9.5	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08	—	—	—	—	—	—	0.10	—	—	0.25
34	43 Cas	10221	A1.2	0.07	0.09	0.14	0.14	0.11	—	0.08	0.18	0.20	0.16	0.13	—	—	0.05	—	—	—	0.07	0.19	—	—	0.08	0.13	0.08	0.38
35	30 UMa	89822	A1.0	0.11	0.15	0.10	0.06	0.22	0.06	—	0.10	—	0.13	0.15	—	—	—	0.08	0.08	0.14	0.46	0.05	0.07	0.10	0.10	0.44	—	0.44
36	53 Aur	47152	A0.3	0.06	0.10	—	0.08	0.17	—	—	—	—	—	0.06	0.12	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.07	0.09	—	—	0.44
37	45 Her	151525	A1.0	—	0.07	0.05	0.10	0.21	—	—	0.19	—	0.10	0.16	—	—	—	—	—	—	0.12	0.15	—	0.20	0.05	0.08	0.11	—
38	27 Aur	88104	A2.5	0.10	0.12	0.17	0.22	0.26	0.09	0.08	0.12	0.02	0.10	0.23	—	0.09	0.13	0.08	0.23	0.12	0.19	0.13	0.12	—	—	—	—	0.46
39	HR 6325	153882	A7.3	0.08	0.19	0.27	0.28	0.40	0.14	0.14	0.17	0.21	0.84	0.52	0.31	—	0.09	0.13	—	0.47	—	—	0.45	0.15	0.19	0.23	0.52	
40	17 Com	108662	A1.0	0.03	0.06	0.21	0.12	0.13	0.05	0.12	0.16	0.16	0.45	0.10	0.24	0.07	0.05	0.04	0.13	0.19	0.10	0.46	0.03	0.03	—	—	—	0.46
41	HR 465	9996	A0.5	0.02	0.11	0.13	0.06	0.05	—	—	0.27	0.09	0.20	0.15	0.07	0.02	—	—	—	0.04	0.12	0.06	0.04	0.05	0.03	0.08	0.33	—
42	HR 7058	173650	A0.4	—	0.07	0.13	0.08	0.09	0.04	0.04	0.13	0.11	0.07	0.09	0.06	0.01	0.02	0.03	0.16	0.05	0.08	0.03	—	—	—	—	—	0.18
43	HR 234	4778	A1.7	0.03	0.12	0.25	0.10	0.18	0.11	0.12	0.32	0.13	0.30	0.19	0.03	0.05	0.03	0.09	0.23	0.11	0.06	0.12	0.08	0.07	0.32	—	—	0.32
44	41 Tau	25823	B9.5	—	—	0.09	0.04	0.04	0.05	0.03	0.02	—	0.04	—	0.04	—	0.05	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	—	—	—	—	—	0.17
45	HR 2534	49976	A0.6	—	0.04	0.09	0.07	0.09	0.06	0.06	—	0.07	0.06	0.11	0.14	—	—	—	—	0.07	0.45	0.07	0.40	0.05	0.04	—	—	0.48
46	γ Gem	47105	A1.1	—	—	0.07	—	0.10	0.03	—	0.03	—	0.03	0.09	0.15	0.06	0.05	0.05	—	—	0.10	0.12	0.09	0.12	0.05	—	—	0.48
47	β UMa	85448	A2.8	0.04	—	0.06	0.12	0.10	0.09	—	0.09	—	0.05	0.07	0.11	0.14	0.06	—	0.04	0.10	—	—	—	0.12	0.08	—	—	0.64
48	θ Vir	114330	A1.0	—	—	0.05	0.06	—	—	0.04	—	—	—	0.06	0.13	—	0.01	—	—	0.08	0.05	0.08	0.08	0.13	0.04	—	—	0.44
49	θ Leo	97633	A1.3	—	0.04	0.05	0.09	0.10	—	—	0.04	—	0.04	—	0.05	0.15	—	—	0.03	0.05	0.07	—	0.13	0.16	0.03	—	—	—
50	HR 8216	204411	A1.8	0.04	0.12	0.42	0.42	0.08	0.21	0.06	0.06	—	0.09	—	0.16	—	0.07	0.08	0.09	—	0.11	0.09	0.08	0.09	—	—	—	0.04
51	HR 4876	110066	A3.7	0.04	0.11	0.27	0.31	0.32	0.13	0.13	0.17	0.31	0.30	0.28	0.41	0.14	0.10	0.07	0.22	0.46	0.23	0.09	0.27	0.13	0.07	0.50	—	0.50
52	78 Vir	118022	A2.5	0.10	0.16	0.23	—	—	—	0.11	0.14	0.26	0.12	0.22	0.33	0.11	0.07	—	0.11	0.29	0.17	0.18	0.14	0.08	0.12	0.50	—	0.50
53	73 Dra	196502	A2.8	0.17	0.17	0.27	0.20	0.19	0.14	0.14	0.11	0.26	0.30	0.14	0.34	0.11	0.04	0.07	0.13	0.31	0.15	0.15	0.10	0.08	0.07	0.61	—	0.61
54	η Vir	107259	A1.4	0.04	0.05	0.04	0.09	—	0.04	—	0.05	0.03	0.11	0.11	—	—	0.03	0.02	0.07	0.10	0.11	0.09	—	—	—	—	—	0.38
55	HR 7575	188041	A3.6	0.10	0.14	0.20	0.19	0.34	0.11	0.14	0.59	0.50	0.52	0.69	0.27	0.02	0.09	0.37	0.46	0.17	0.25	—	—	—	—	—	—	0.63
56	ω Her	148112	A0.2	0.03	0.04	0.05	0.07	0.12	0.04	—	0.06	—	0.04	0.10	0.04	0.03	—	—	0.06	0.12	0.05	0.07	—	—	—	—	—	0.22

Т А В Л И Ц А 1 (продолжение)

№ п/п	Звезда	Номер по HD	Sp	SiI			SiII			MnII			CrI	CrII					SrII		YII				
				4200	4131	4128	3862	3856	3854	4282	4206	4137		4254	4559	4275	4262	4242	4111	4042	4215	4162	4077	4309	4177
57	21 Com	108945	A2.0	0.19	—	0.34	0.54	0.12	0.28	0.10	0.07	0.40	0.08	0.11	0.21	0.13	0.12	0.13	0.18	0.11	0.79	0.29	1.01	0.12	—
58	3 Hya	72968	A1.5	—	0.05	0.40	0.11	0.02	0.40	0.02	0.03	0.11	0.04	0.15	0.33	0.20	0.22	0.20	0.19	0.18	0.63	0.21	0.30	0.06	0.10
59	α Psc	12447	A1.5	0.19	—	0.20	0.48	0.09	0.20	0.40	0.07	0.06	0.11	0.14	0.27	0.17	0.12	0.40	0.11	0.17	0.19	0.08	0.25	0.08	0.12
60	52 Her	452107	A1.7	0.16	—	0.04	0.19	0.05	0.28	0.21	0.08	0.03	—	0.12	—	0.08	0.07	0.06	0.08	0.09	0.30	0.07	0.65	0.22	0.09
61	68 Tau	27962	A2.7	0.19	—	0.46	0.20	0.16	0.38	0.40	—	—	0.04	0.11	0.24	0.09	0.11	0.13	—	0.14	0.24	0.40	0.21	0.13	0.15
62	λ UMa	89021	A1.2	—	—	0.14	0.44	0.11	0.20	0.05	0.05	—	0.07	0.05	0.13	0.08	0.05	0.08	—	0.08	0.15	0.07	0.17	—	0.09
63	β Ser	441003	A3.4	—	—	0.41	0.19	0.11	0.12	0.14	—	0.31	—	—	—	0.09	—	—	—	0.18	0.20	—	0.24	0.12	0.33
64	γ Cet	46970	A2.9	—	—	0.14	0.11	—	0.19	0.08	—	—	—	—	—	0.15	—	—	—	0.15	0.14	0.12	0.11	0.11	0.22
65	HR 4854	411133	A2.1	0.18	0.14	0.24	0.29	0.13	0.39	0.44	0.20	0.42	0.10	0.20	0.33	0.08	0.23	0.14	0.17	0.15	0.52	0.21	0.60	0.10	0.16
66	10 Aql	176232	A1.7	0.22	0.05	0.10	0.21	0.04	0.27	0.08	0.06	0.08	0.05	0.14	0.13	0.08	0.09	0.10	0.42	0.40	0.49	0.19	0.51	0.13	0.18
67	γ UMi	137422	A5.7	0.19	—	0.20	0.27	—	0.23	—	—	—	—	—	—	0.29	—	—	—	—	0.14	0.13	0.20	0.17	—
68	θ ² Tau	28319	A1.4	0.12	0.03	0.09	0.14	—	0.12	—	0.06	0.03	0.08	0.08	0.06	0.09	0.05	0.05	—	0.06	0.18	0.08	0.26	0.08	0.08
69	ι Cas	45089	A0.9	0.06	0.03	0.02	0.13	—	0.19	0.04	0.02	0.04	0.01	0.09	0.22	0.07	0.09	0.04	0.10	0.08	0.35	0.01	0.59	0.10	0.08
70	HR 876	20210	A7.1	0.31	0.09	0.20	0.26	0.09	0.27	0.07	0.11	0.08	0.16	0.18	0.22	0.09	0.12	0.19	0.06	0.22	0.29	0.15	0.43	0.23	0.25
71	δ Her	455974	A3.3	—	—	0.19	0.23	—	0.23	—	—	—	0.11	—	—	0.46	—	—	—	0.23	0.43	0.11	0.22	—	0.26
72	β Tri	43161	A3.7	0.22	—	0.25	0.16	—	0.23	0.08	0.08	0.08	0.06	0.12	0.11	0.13	—	0.09	—	0.13	0.25	0.10	0.35	0.19	0.20
73	2 Hya	71297	A3.8	0.20	0.40	0.46	0.19	0.14	0.26	—	0.17	0.08	0.14	0.18	0.16	0.16	0.11	0.13	0.10	0.16	0.28	0.12	0.30	0.16	0.23
74	δ Del	197461	A3.3	0.19	—	0.09	0.14	0.08	0.45	0.07	0.15	0.07	0.10	0.12	0.10	0.15	0.05	0.07	0.05	0.15	0.33	0.18	0.36	0.25	0.21
75	γ Boo	127762	F0.0	0.31	—	0.44	0.29	—	0.23	0.29	—	—	0.44	—	—	0.17	0.38	0.15	—	0.23	0.29	0.33	0.49	—	0.45
76	γ Eql	204601	A5.0	0.29	0.04	0.19	0.31	0.05	0.34	0.09	0.12	0.40	0.15	0.17	0.22	0.08	0.44	0.12	0.43	0.17	0.86	0.30	0.92	0.27	0.30
77	β CrB	137909	F0.0	—	0.40	0.23	0.47	0.04	0.17	0.21	0.14	0.19	0.24	0.29	0.44	0.11	0.19	0.26	0.28	0.27	0.61	0.38	0.59	0.21	0.32
78	HR 4369	98088	A7.0	0.44	0.40	0.40	0.38	0.20	0.24	0.38	0.09	0.14	0.15	0.30	—	0.25	0.24	0.12	0.31	0.20	0.90	0.46	0.68	0.25	0.16
79	γ Vir N	110375	A7.5	0.22	0.17	0.13	0.23	0.07	0.22	0.15	0.23	0.11	0.18	0.20	0.21	0.26	0.10	0.15	—	0.17	0.39	0.13	0.36	0.25	0.20
80	ζ Leo	89025	F0.0	0.38	—	0.33	0.44	0.08	0.28	0.24	—	—	0.12	0.10	0.18	0.20	0.08	0.09	0.13	0.16	0.33	0.23	0.66	0.28	0.19
81	21 Per	18295	A0.3	0.12	—	0.31	0.30	0.20	0.21	0.05	0.08	—	0.04	0.07	0.21	0.06	0.40	0.07	0.08	0.16	0.43	0.05	0.20	—	0.10
82	CG And	224801	B9.9	0.10	0.05	0.44	0.40	0.28	0.29	—	—	—	0.06	—	0.10	—	0.08	0.03	0.08	0.10	0.41	0.04	0.20	0.02	0.03
83	ε UMa	412185	A0.3	0.08	—	0.03	0.07	—	0.07	—	0.06	0.06	0.04	0.10	0.24	0.07	0.40	0.09	0.03	0.11	0.11	0.07	0.10	0.04	0.06
84	HR 1242	25291	A5.3	0.22	0.07	0.10	0.30	0.14	0.34	0.11	0.11	0.08	0.10	0.11	0.16	0.11	0.17	0.15	0.12	0.23	0.35	0.25	0.43	0.18	0.26

№ п/п	Звезда	Номер по HD	Sp	YII	HgII	GaII		P II		EuII		CeII	SmII	LaII	Gd II		ScII		CoI		MgII				
				3950	3984	4262	4251	4172	4475	4414	4205	4129	3930	4289	4433	4041	4287	4391	4132	4415	4314	4247	4119	3845	4481
57	21 Com	108945	A2.0	—	0.12	0.08	0.20	0.11	0.02	0.11	0.54	0.09	0.27	0.16	0.05	0.08	0.19	0.34	0.21	0.17	0.07	0.17	0.14	0.62	
58	3 Hya	72968	A1.5	0.02	0.08	0.22	0.18	0.05	0.04	0.08	0.02	0.07	0.11	0.08	0.02	0.05	0.06	0.19	0.11	0.03	0.08	0.04	—	0.30	
59	α Psc	12447	A1.5	—	0.10	0.12	0.09	0.20	0.06	0.12	0.48	0.16	0.20	0.04	0.10	0.05	0.14	0.24	0.07	0.12	0.09	0.07	0.05	0.31	
60	52 Her	152107	A1.7	—	—	0.08	0.09	0.14	—	—	0.10	0.12	0.18	0.24	—	0.03	—	0.17	—	0.19	0.11	0.16	0.08	—	
61	68 Tau	27962	A2.7	0.11	0.15	0.11	0.13	0.13	0.12	0.04	0.08	—	0.21	0.19	0.08	0.05	0.12	0.14	0.12	0.30	0.10	0.11	—	0.43	
62	λ UMa	89021	A1.2	—	0.05	0.05	0.08	—	0.06	—	0.04	—	0.08	0.12	—	0.02	—	0.10	0.07	0.18	—	0.08	—	0.49	
63	β Ser	141003	A3.4	—	—	—	0.35	—	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—	0.30	0.26	0.04	0.26	—	0.35		
64	γ Cet	16970	A2.9	—	—	—	0.20	0.12	—	—	—	—	0.13	—	0.05	—	—	0.27	—	0.20	—	—	0.53		
65	HR 4854	111133	A2.1	0.05	0.11	0.23	0.19	0.32	0.10	0.17	0.16	0.22	0.18	0.22	0.09	0.08	0.09	0.32	0.13	0.19	0.14	0.16	0.21	0.36	
66	10 Aql	176232	A1.7	0.10	0.23	0.09	0.08	0.15	0.11	0.06	0.17	0.13	0.02	0.27	0.09	0.06	0.12	0.24	0.10	0.05	0.08	0.24	0.09	0.35	
67	γ UMi	137422	A5.7	0.18	0.13	—	—	—	—	—	—	0.04	0.27	—	—	—	0.22	—	0.46	0.31	0.15	—	0.60		
68	β ² Tau	28319	A1.4	0.07	0.07	0.05	0.18	0.15	—	—	0.05	0.07	—	0.25	—	0.06	0.04	0.09	0.17	0.15	0.22	0.12	0.10	0.41	
69	ι Cas	15089	A0.9	0.02	0.08	0.09	0.05	0.14	0.05	0.03	0.04	0.08	0.64	0.24	0.04	0.01	0.15	0.07	0.12	0.03	0.07	0.02	0.05	0.47	
70	HR 976	20210	A7.1	0.10	0.15	0.12	0.25	0.20	0.14	0.05	0.19	0.08	0.32	0.37	0.11	0.19	0.05	0.15	0.23	0.22	0.15	0.12	0.18	0.32	
71	δ Her	155974	A3.3	—	—	—	0.28	—	—	—	—	—	—	0.29	—	—	—	0.34	0.16	0.15	0.11	—	0.55		
72	β Tri	13161	A3.7	—	—	—	0.26	—	0.10	—	0.08	—	—	0.30	—	0.09	—	—	0.25	0.24	0.31	0.11	0.10	0.40	
73	2 Hya	71297	A3.8	—	0.14	0.11	0.19	—	0.13	—	0.08	—	0.43	0.25	0.11	0.12	0.07	0.12	0.13	0.21	0.20	0.16	0.10	0.37	
74	δ Del	197461	A3.3	0.21	0.14	0.05	0.25	0.16	0.10	0.13	0.08	—	0.40	0.08	0.14	0.05	0.09	0.28	0.23	0.21	0.25	0.04	0.04	0.28	
75	γ Boo	127762	F0.0	—	—	—	0.27	0.60	0.14	—	—	—	0.56	—	0.16	—	—	0.43	0.31	0.26	—	0.12	—	0.60	
76	γ Equ	201601	A5.0	0.11	—	0.14	0.19	0.19	0.15	0.05	0.31	0.29	0.41	0.55	0.17	0.10	0.05	0.26	0.42	0.22	0.13	0.12	0.31	0.10	0.70
77	β CrB	137909	F0.0	—	0.19	0.19	0.22	0.38	0.19	0.23	0.48	0.52	0.31	0.56	0.36	0.13	0.05	0.30	0.54	0.29	0.28	0.29	0.21	—	0.61
78	HR 4369	98088	A7.0	0.21	0.29	0.24	0.20	0.22	0.29	—	0.26	0.40	0.19	0.50	—	0.22	0.06	0.18	0.35	—	0.17	0.10	0.16	0.46	0.29
79	γ Vir N	110375	A7.5	0.20	0.13	0.10	0.31	—	0.14	0.03	0.10	0.13	0.17	0.52	—	0.19	—	0.17	0.33	0.31	0.39	—	0.25	0.13	0.41
80	ζ Leo	89025	F0.0	—	0.20	0.09	0.28	—	0.12	—	0.25	—	—	0.65	—	0.15	—	—	0.39	—	—	—	0.26	0.17	0.60
81	21 Per	18265	A0.3	—	—	0.09	0.05	—	0.02	0.08	0.14	—	0.07	0.10	0.07	0.03	0.04	0.06	0.09	—	0.06	0.03	0.04	—	0.28
82	CG And	224801	B9.9	—	0.06	0.02	—	0.06	—	0.04	0.14	—	0.42	0.09	0.02	0.05	0.05	0.11	0.04	0.09	—	0.07	0.04	0.11	
83	ε UMa	112185	A0.3	—	0.06	0.10	0.06	0.11	0.06	0.03	0.10	0.07	0.04	0.07	—	—	—	0.11	0.06	—	0.05	0.10	0.06	0.32	
84	HR 1242	25291	A5.3	0.21	0.15	0.17	0.19	0.23	0.13	0.06	0.22	0.10	0.19	0.40	0.06	0.10	0.05	0.17	0.25	0.31	0.15	0.12	0.10	0.19	0.40

§ 2. «СТЕПЕНЬ ПЕКУЛЯРНОСТИ»

Ввести «степень пекулярности» для звезд Ар в той форме, в какой введена «степень металличности» для звезд Ам (как разность «металлического» и «водородного» спектров) не представляется возможным. В спектрах звезд Ар эквивалентные ширины W_λ линий некоторых элемен-

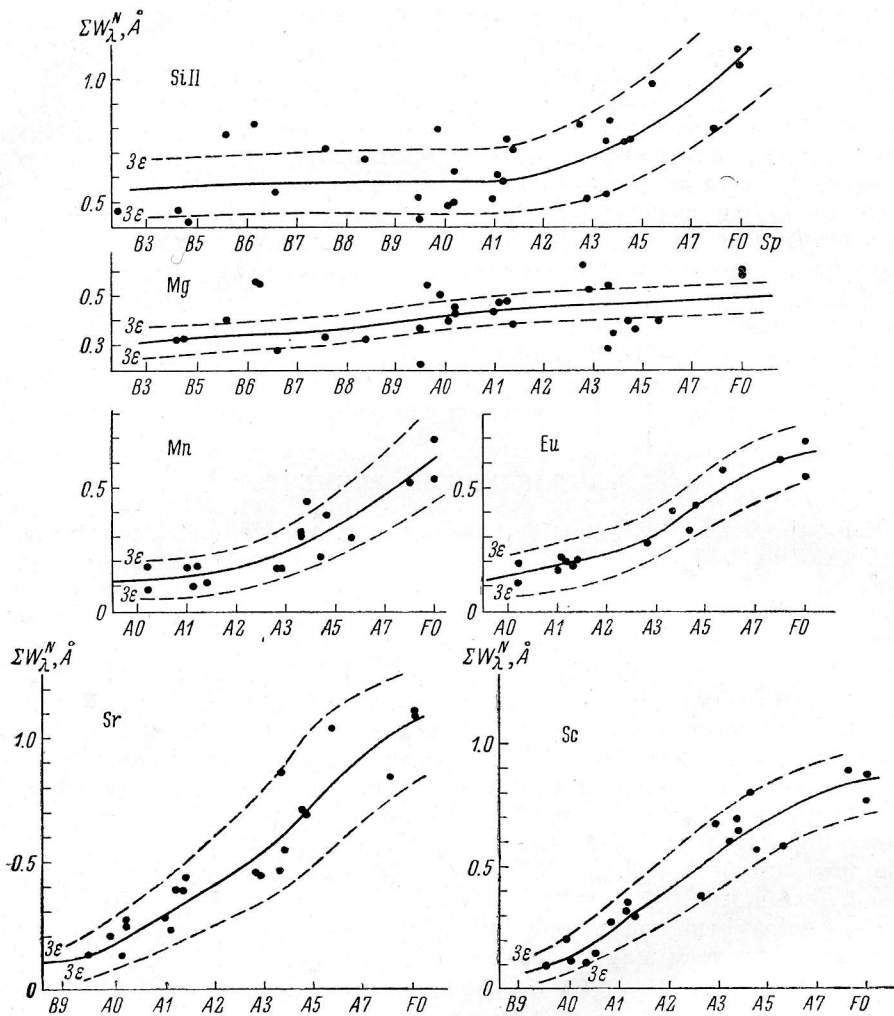


Рис. 1. Зависимости сумм эквивалентных ширин (ΣW_λ^N) измеренных спектральных линий для SiII, Mg, Mn, Eu, Sr и Sc от спектрального класса (Sp) для нормальных звезд.

Пунктирные кривые проведены через значения, отличающиеся от средних на три вероятные ошибки (3σ).

тов настолько увеличены по сравнению с линиями в спектрах нормальных звезд, что по ним невозможно приписать пекулярной звезде какой-либо спектральный класс. Эта трудность обусловлена тем, что значения W_λ линий таких «пекулярных» элементов на калибровочных кривых, построенных по нормальным звездам, лежат значительно ниже, чем соответствующие значения W_λ для звезд Ар.

Однако полученные в [1] количественные определения спектральных классов для нормальных и пекулярных звезд А позволили ввести количественный параметр пекулярности («степень пекулярности» — P) и исследовать особенности спектров звезд Ар в отношении «пекулярных» элементов. Делалось это следующим образом. Для каждого исследуемого элемента из табл. 1 были подсчитаны суммы эквивалентных ширин (ΣW_λ) нескольких линий, измеренных для всех звезд. Затем были построены зависимости значений ΣW_λ от спектрального класса для нормальных звезд (см. рис. 1). После этого для каждой звезды с учетом ее спектрального класса определялись отношения $P = \frac{\Sigma W_\lambda^*}{\Sigma W_\lambda^N}$, где ΣW_λ^* — значение, подсчитанное для звезды по табл. 1, а ΣW_λ^N — значение для данного спектрального класса, снятое со средней кривой, построенной для исследуемого элемента по нормальным звездам. За спектральный класс звезды бралось среднее взвешенное из ее спектральных классов, определенных количественно по линиям He, Fe и Ti [1]. Поскольку этот спектральный класс для пекулярных звезд оказывается практически всегда несколько более поздним, чем спектральный класс, находимый по показателю цвета B—V, то значения P для звезд Ар получались бы еще большими при использовании Sp (B—V). В данном случае, используя Sp (He, Fe, Ti), мы принимаем эти три элемента как бы за стандартные по отношению к исследуемым «пекулярным» элементам.

§ 3. ИССЛЕДУЕМЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

К р е м н и й. Величины P для кремния определялись по сумме W_λ для линий $\lambda\lambda$ 4131, 4128, 3862, 3856 и 3854 SiII и затем, отдельно, для линий λ 4200 SiII и λ 3905 SiI. Зависимость ΣW_λ от спектрального класса для SiII приведена на рис. 1. Линии SiII имеют максимальные значения W_λ в области спектральных классов B9—A0, и подъем кривой за спектральным классом A1 вызван, вероятно, какой-то блендой. Линии $\lambda\lambda$ 4128.05, 3856.02, 3853.66 SiII блендируются линиями $\lambda\lambda$ 4128.74, 3856.74 FeII и λ 3852.57 Fe I соответственно. Линии железа из-за малой разницы в длине волны можно выделить только в случае малой скорости вращения звезды и по спектрограммам с большой дисперсией. В нашем же случае именно они, по-видимому, и вызывают подъем кривой на рис. 1, начиная от спектрального класса A1.5. Кроме того, при расчете P (Si) необходимо учитывать, что линия λ 4130.88 Si II может образовывать бленду с линией λ 4129.73 Eu II.

Вероятная относительная ошибка ϵ одного значения эквивалентной ширины, найденная нами, меняется в пределах от 8% для $W_\lambda \approx 0.2$ — 0.3 \AA до 20% для $W_\lambda \approx 0.05 \text{ \AA}$. На основании теории ошибок [2] можно на графиках зависимостей ΣW_λ от Sp и P от Sp определить границы, соответствующие одной, двум и т. д. вероятным ошибкам. Как видно из рис. 1, почти все значения лежат в пределах трех вероятных ошибок (3ϵ). Исключения составляют значения ΣW_λ (Si II) для двух ранних нормальных звезд (Aq1 и HD 138764). Значения P (Si) для этих же звезд выходят за границы двух вероятных ошибок, и, следовательно, с вероятностью, большей 0.82, можно считать, что у этих звезд усилены линии кремния.

На рис. 2, на котором сопоставлены значения P со спектральным классом (Sp), видно, что все значения P (SiII) для нормальных звезд находятся в пределах двух вероятных ошибок (о двух исключениях см. выше); следовательно, Ар-звезды, значения P для которых выходят за эти пределы, обладают аномалией в отношении кремния и являются «кремниевыми» звездами (при P (SiII) > 1). Необходимо отметить, что некоторые

звезды, ранее классифицировавшиеся как Si-звезды, не оказываются таковыми при количественном рассмотрении, и наоборот. Таким образом, величина P для кремния может служить критерием пекулярности звезды в отношении этого элемента.

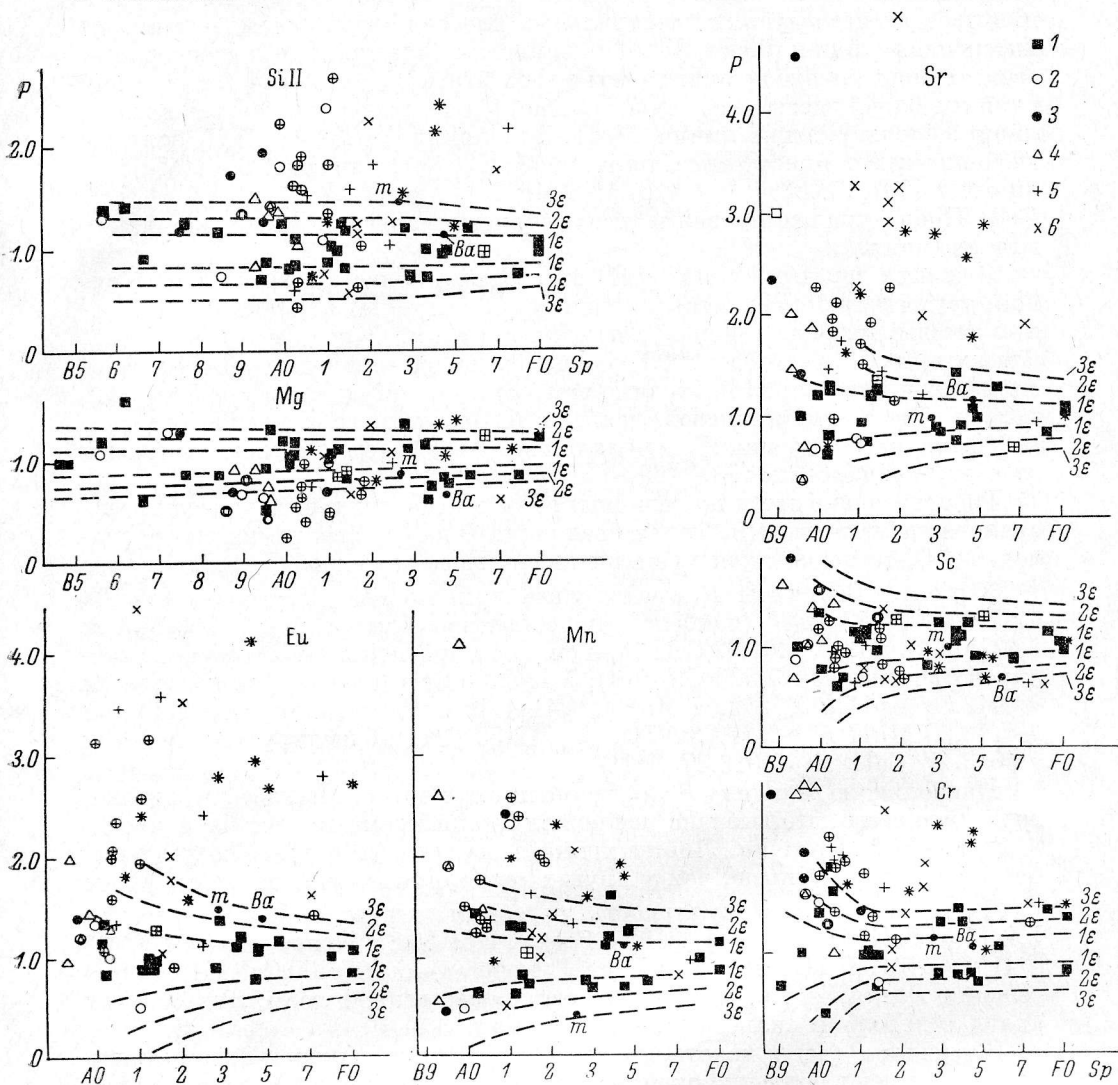


Рис. 2. Сопоставление значений P для Si II, Mg, Eu, Mn, Sr, Sc и Cr со спектральными классами.

1 — нормальные звезды, 2 — Si-звезды, 3 — звезды типа Si λ 4200, 4 — Mn-звезды, 5 — Cr- и Cr-Eu-звезды, 6 — Sr-звезды, Ba — бариевая звезда, m — металлическая звезда. Комбинированные значки указывают на присутствие обеих пекулярностей. Пунктирные кривые проведены через значения P , отличающиеся от единицы на одну (1ε), две (2ε) и три (3ε) вероятные ошибки.

Зависимость величины P от спектрального класса (см. рис. 2) позволяет заключить, что «степень пекулярности» кремния постепенно растет от значений для нормальных звезд ($P=0.7 \div 1.3$) к значениям для звезд Ap, т. е. нет резкого разделения на нормальные и пекулярные A-звезды по величине P (Si II). Этот вывод применим и к другим типам пекулярностей.

Характер зависимостей P (Si I) и P (Si λ 4200) от спектрального класса аналогичен рассмотренной выше зависимости; однако, из-за меньшей точ-

ности определения P , разброс значений P для нормальных звезд в этих случаях больше.

М а р г а н е ц. Пекулярность марганца исследовалась по эквивалентным ширинам линий $\lambda\lambda$ 4282, 4206 и 4137 MnII. Линии марганца в нормальных звездах исследуемых спектральных классов очень слабы — наиболее интенсивные линии имеют W_λ лишь немногим больше 0.1 Å (в пекулярных звездах эквивалентная ширина может достигать $W_\lambda \approx 0.3-0.4$ Å). Поэтому влияние бленд здесь очень существенно. Ниже указаны наиболее важные линии, блендирующие линии MnII. Для линии λ 4282.48 MnII большое значение имеет присутствие линии λ 4282.41 FeI, для λ 4206.40 MnII — линии λ 4207.51 CrI и для λ 4136.93 MnII — линий λ 4136.50 и λ 4137.00 FeI. Процедура исследования пекулярности марганца такая же, как и для кремния.

В связи с тем что W_λ для MnII очень малы, области, ограниченные одной, двумя и тремя вероятными ошибками, в которых находятся нормальные звезды, на рис. 2 больше, чем для кремния. Однако и здесь звезды, для которых P превышает 1.0 больше, чем на две вероятные ошибки, отнеслись к Mn-звездам. Необходимо заметить, что звезду β Ser с $P(\text{Mn})=1.8$ нельзя считать «марганцевой», так как из-за быстрого вращения ($v \sin i \approx 200$ км/сек.) значения W_λ для линий Mn у этой звезды сильно завышены за счет блендирования.

Распределение звезд по величинам P и по спектральным классам здесь аналогично кремниевым. Только величина P для марганца достигает значения 4.5, тогда как для кремния наибольшее значение $P \approx 3.2$.

Х р о м. Величины P вычислялись для линий λ 4558.65 + λ 4558.83 CrII, λ 4275.57 CrII (наиболее существенная бленда λ 4274.56 TiII и λ 4275.91 EuII), λ 4261.92 CrII (при сильном вращении звезды может блендироваться линией λ 4260.48 FeI), λ 4242.38 CrII (блендируется линиями λ 4242.30 MnII и λ 4242.47 MnII), λ 4111.59 CrII (блендируется линиями λ 4110.63 MnII и λ 4111.78 VII), λ 4012.50 CrII (блендируется линиями λ 4012.47 FeII и λ 4012.37 TiII).

Наибольшую величину P для хрома имеют марганцевые звезды, однако, вероятнее всего, это вызвано усилением линий хрома за счет блендирования линиями марганца. Линии хрома в звездах Ar в среднем усилены, но это усиление меньше, чем у других «пекулярных» элементов.

С т р о н ц и й. Пекулярность стронция определялась по линиям λ 4215.51 SrII (бленда — λ 4216.19 FeI), λ 4161.80 SrII (бленда — λ 4161.05 CrII и λ 4161.50 TiII) и λ 4077.71 SrII (бленда — λ 4077.00 CrI). При определении P для SrII бленды не играют существенной роли, так как их вклад в довольно сильные линии SrII мал.

Значения $P(\text{Sr})$ у некоторых звезд Ar велики. Учитывая, что линии стронция имеют большую эквивалентную ширину, можно сделать заключение, что стронций является одним из наиболее «пекулярных» элементов в звездах Ar.

И т т р и й. Измерялись значения W_λ для линий λ 4309.60 YII (бленда — λ 4309.75 CrII), λ 4177.54 YII (бленда — λ 4178.87 FeII) и λ 3950.35 YII. Значения P для звезд Ar со спектральными классами более поздними, чем A1.0, лишь незначительно увеличены по сравнению с P для нормальных звезд, в области же спектральных классов, более ранних, чем A0, P для звезд Ar достигает больших значений. Все же это едва ли указывает на значительную пекулярность иттрия, так как для линий иттрия эквивалентные ширины $W_\lambda \approx 0.01-0.02$ Å, т. е. очень малы, и значения $P(\text{Y})$ определяются с большими ошибками.

Р т у т ь. До недавнего времени линии ртути не были обнаружены в звездных спектрах, и, по исследованиям химического состава Земли и

метеоритов, ртуть — один из наименее распространенных элементов [3]. Однако в 1962 г. Байдельмен [4] приписал ионизированной ртути линию $\lambda 3983.95$ в звезде \times Спс («марганцевая» звезда Ар). Эта линия ранее отождествлялась как линия $\lambda 3983.95$ FeI. По сравнению с другими линиями того же мультиплета (277) линия $\lambda 3983.95$ в \times Спс значительно усилена. Если усиление этой линии FeI вызвано наличием линии ртути с такой же длиной волны, то следует считать, что содержание ртути в \times Спс увеличено в 40 000 раз. К сожалению, в исследуемой здесь спектральной области больше нет интенсивных линий ртути и все выводы приходится делать на основании этой линии, к тому же блендированной линией железа. В спектрах нормальных звезд эта линия слаба, значение же W_λ этой линии в звездах Ар превышает величину для нормальных в 2—4 раза ($P(H) = 2 \div 4$).

Г а л л и й. Значения P для галлия определялись по линиям иона $\lambda\lambda 4261.98, 4251.15$ и 4172.05 . Необходимо отметить, что некоторые блендирующиеся с ними линии относятся также к «пекулярным» элементам ($\lambda 4261.92$ CrII, $\lambda 4252.82$ CrII, $\lambda 4251.73$ MnII, $\lambda 4250.79$ FeI, $\lambda 4172.13$ FeI, $\lambda 4171.92$ CrII и $\lambda 4171.54$ MnII). Поэтому некоторые завышения интенсивности линий Ga в звездах Ар по сравнению с нормальными могут быть обусловлены блендами.

Ф о с ф о р. В последнее время в некоторых звездах Ар (\times Спс, HD 20785, 3 Cen A) были обнаружены интенсивные линии PII. Наиболее интенсивными из этих линий в исследуемой спектральной области являются линии $\lambda\lambda 4475$ и 4414 PII, однако вторая линия была обнаружена нами лишь у двух нормальных звезд программы и поэтому для определения P была использована только линия $\lambda 4475.27$ PII (бленда $\lambda 4476.02$ FeI). Величины P изменяются для звезд Ар в пределах от 1.0 до 2.5.

С к а н д и й. $P(Sc)$ вычислялось по линиям: $\lambda 4415.56$ ScII (бленда — $\lambda 4415.12$ FeI), $\lambda 4314.08$ ScII (бленда — $\lambda 4314.25$ FeII и $\lambda 4314.98$ TiII) и $\lambda 4246.83$ ScII (бленда — $\lambda 4247.88$ EuII и $\lambda 4247.86$ MnII). Значения $P(Sc)$ звезд Ар лежат в области значений $P(Sc)$ для нормальных звезд. Следовательно, можно сказать, что в звездах Ар интенсивности линий скандия нормальны.

К о б а л ь т. $P(Co)$ вычислялось по линиям: $\lambda 4118.77$ CoI (бленда — $\lambda 4118.55$ FeI) и $\lambda 3845.50$ CoI (бленда — $\lambda 3845.18$ FeI). Зависимость $P-Sr$ для кобальта похожа на аналогичную зависимость для скандия, хотя здесь наблюдается небольшое превышение значений P для звезд Ар по сравнению со значениями для нормальных звезд. Кажущееся значительное относительное (для звезд Ар по сравнению с нормальными) усиление линий кобальта в области спектральных классов В9-А2, так же как у иттрия, вызвано малым абсолютным увеличением эквивалентных ширин линий.

М а г н и й. Определения P для магния проводились по линии $\lambda 4481$ MgII. Так как линия эта довольно интенсивна и ошибки определения W_λ малы, разброс точек на зависимости $W_\lambda-Sr$ (см. рис. 1) обусловлен естественной дисперсией. Сопоставление P со спектральным классом позволяет заключить, что W_λ уменьшена в спектрах звезд Ар в интервале спектральных классов от В7 до А2 и слегка увеличена в звездах более поздних спектральных классов. Этот вывод подтверждает результаты предыдущих исследований обилия магния в звездах Ар [5], в которых показано, что в среднем в интервале спектральных классов от В3 до А2 логарифм числа атомов Mg в атмосферах звезд Ар на 0.3 меньше, а после А2 — на 0.6 больше, чем в атмосферах нормальных звезд.

Редкоземельные элементы. Наиболее замечательным свойством звезд Ар является значительное усиление линий редкоземельных элементов. Здесь были исследованы линии EuII, CeII, SmII, LaII, GaII.

В спектрах некоторых звезд Ар усилены также линии Dy и Pr, однако, из-за слабости или даже полного отсутствия этих линий в спектрах нормальных звезд, а также из-за значительного блендирования линий этих элементов, линий Dy и Pr нами не исследовались. В случае Ce, Sm, Gd полученные результаты тоже могут дать лишь самое общее представление о поведении этих элементов в исследуемых звездах, так как и здесь бленды оказывают существенное влияние на эквивалентные ширины исследуемых линий.

Наиболее надежными можно считать результаты, полученные для европия. Для нахождения $P(\text{Eu})$ использовались линии $\lambda 4205.08 \text{ EuII}$ (бленда — $\lambda 4205.37 \text{ MnII}$), $\lambda 4129.73 \text{ EuII}$ (бленда — $\lambda 4128.74 \text{ FeII}$) и $\lambda 3930.50 \text{ EuII}$ (бленды — $\lambda 3930.30 \text{ FeI}$ и $\lambda 3930.97 \text{ MnII}$). На рис. 2, где приведено сопоставление значений P для Eu со спектральным классом, видно, что все нормальные звезды имеют значения P , отличающиеся от 1 не более, чем на две вероятные ошибки. В то же время пекулярные звезды имеют значения P , выходящие далеко за эти пределы.

Зависимости P для церия, который исследовался по линиям $\lambda 4289.45 \text{ CeII} + \lambda 4289.94 \text{ CeII}$ (бленды — $\lambda 4289.72 \text{ CrI}$, $\lambda \lambda 4289.07$ и $\lambda 4290.23 \text{ TiII}$) и гадолиния, исследовавшегося по линиям $\lambda 4390.95 \text{ GaII}$ (бленды — $\lambda 4390.86 \text{ SmII}$, $\lambda 4390.98 \text{ TiII}$) и $\lambda 4132.28 \text{ GaII}$ (бленды — $\lambda 4132.06 \text{ FeII}$, $\lambda 4132.41 \text{ CrII}$), имеют сходный характер. Значения $P(\text{Ce})$ и $P(\text{Ga})$ для звезд Ар превышают соответствующие величины P для нормальных звезд. Разброс значений для нормальных звезд — в пределах ошибок. Правда, для церия он больше, что, вероятно, вызвано сильным блендированием (линиями TiII).

Самарий исследовался по линиям $\lambda 4433.88 + \lambda 4434.32 \text{ SmII}$ (бленда — $\lambda 4433.99 \text{ MgII}$) и $\lambda 4041.68 \text{ SmII}$ (бленда — $\lambda 4041.36 \text{ MgI}$ и $\lambda 4041.79 \text{ CrII}$). Значения $P(\text{Sm})$ для звезд Ар в среднем выше, чем для нормальных звезд. Кроме того, необходимо учитывать, что бленда магния занижает значения $P(\text{Sm})$ для некоторых звезд Ар. Линии магния в спектрах звезд Ар несколько ослаблены, и за счет этого значение $\Sigma W_{\lambda}^*(\text{Sm})$ (куда входит бленда магния) для звезд Ар уменьшается, а следовательно, уменьшается и $P(\text{Sm})$. Таким образом, значения $P(\text{Sm})$ для некоторых звезд Ар должны быть еще больше, чем вычисленные.

Значения P для лантана вычислялись по линии $\lambda 4286.97 \text{ LaII}$ (бленда — $\lambda 4286.31 \text{ FeII}$ и $\lambda 4287.40 \text{ TiI}$). Здесь значения P тоже велики для звезд Ар и достигают 3–5. Однако необходимо отметить, что W_{λ} исследуемой линии LaII у нормальных звезд очень мала (0.05–0.08 Å).

§ 4. СВОЙСТВА ВЕЛИЧИНЫ P

Результаты определения величин P для всех изученных элементов сведены в табл. 2. Кроме того, здесь приведены значения напряженности магнитного поля (H_e) из [6], величина бальмеровского скачка (D) из [7] и тип пекулярности из [8, 9]. В последнем столбце табл. 2 дан тип пекулярности, определенный нами (указана наиболее сильная пекулярность для звезды, независимо от величины P , при условии, что P больше единицы на две вероятные ошибки).

Из анализа зависимостей между P и Sp (рис. 2) можно сделать следующие выводы.

1. Значения P для нормальных звезд лежат в пределах от 0.5 до 1.5; в зависимости от элемента (от обилия и условий возбуждения линий) эта полоса может быть уже или шире. Значения P для нормальных звезд очень редко отличаются от единицы на величину, большую двух вероятных ошибок.

ТАБЛИЦА 2

№ л/л	Звезда (номер по HD)	H_e	D	Элементы														Тип peculiarности			
				Si I λ 4200	Si III	Mn	Cr	Sr	Y	Hg	Ga	P	Eu	Ce	Sm	La	Gd	Sc	Co	Mg	по [8, 9]
1	83754	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	N	N
2	184930	-	-	-	1.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.20	N	N
3	196740	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	N	N
4	138764	-	-	2.00	1.42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.60	N	N
5	210424	-	-	2.30	1.28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.06	N	N
6	35497	-	0.26	-	0.74	-	-	-	-	-	1.65	-	-	-	-	-	-	-	0.50	Si	Si
7	21364	-	0.30	-	1.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.50	Si?	Y?
8	7374	-	-	1.00	1.72	1.08	2.44	1.43	0.75	-	2.72	1.34	-	-	-	-	-	1.28	Si- λ 4200	Si- λ 4200	N
9	23630	-	-	-	0.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.63	N	Mn
10	78316	-640 \pm 460	0.27	1.00	-	1.38	1.92	1.61	0.39	1.28	3.34	1.00	2.23	1.23	-	-	-	0.62	Si-Mn	-	N
11	33904	-170 \pm 325	0.31	2.63	-	1.50	2.64	3.14	2.00	2.48	4.25	-	-	2.06	0.82	-	0.58	1.63	-	-	Mn
12	358	-	0.23	1.00	-	1.32	4.60	2.70	0.67	1.78	2.80	2.50	-	-	-	-	-	1.95	Mn	-	Mn
13	179761	-590 \pm 170	0.28	-	-	1.35	-	0.66	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.81	Si?	N
14	183056	-	0.28	1.18	-	1.80	0.55	1.49	0.67	1.28	-	-	-	1.35	0.70	-	1.90	-	0.69	Sr	Si
15	10625	-	0.30	0.76	-	0.73	-	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.56	N	N
16	159975	-	-	-	-	1.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.88	N	N
17	186882	-	-	-	1.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.86	N	N
18	129274	-75 \pm 190	0.29	2.26	-	1.34	4.10	2.68	1.87	4.00	4.90	2.25	-	1.45	-	-	0.90	1.98	0.90	Mn	Mn
19	174933	-	-	0.75	-	1.05	1.60	1.00	-	1.48	2.87	-	1.20	1.32	0.38	-	-	1.41	0.62	Mn	Mn
20	124224	-	-	-	-	2.56	-	1.65	-	-	3.10	-	-	-	-	-	-	-	1.28	Si	Si
21	40312	-	0.43	1.55	3.10	2.38	2.30	1.06	0.71	0.73	3.25	-	-	0.50	-	-	-	0.67	1.00	0.46	Si
22	123299	-	-	1.77	-	1.12	-	1.28	0.80	2.03	-	-	-	1.00	0.72	-	-	0.87	1.55	1.20	Si?
23	192907	-	-	1.32	-	1.26	-	1.40	1.20	3.00	-	1.40	-	1.15	-	-	-	1.24	1.33	1.20	N
24	172167	-	0.49	0.62	-	0.83	-	0.40	0.63	0.57	-	0.67	-	1.16	-	-	-	0.82	0.75	-	N
25	39317	-	-	3.18	2.04	1.62	1.80	1.88	0.96	0.92	2.37	2.22	1.15	1.62	1.10	-	-	1.61	0.96	Si-Cr-Eu	Si
26	112413	-1400 \pm 1600	0.32	1.47	2.90	1.64	1.30	2.17	0.77	1.73	1.80	1.80	2.00	2.83	1.05	1.11	1.15	1.00	0.82	Si-Cr-Eu	Si-Eu-Cr
27	196724	-	-	1.05	0.90	0.86	1.45	1.87	1.30	1.00	-	1.25	1.22	1.35	-	1.00	-	0.88	0.67	1.04	N
28	218045	-	0.48	1.24	-	0.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.94	N	N

Т А Б Л И Ц А 2 (продолжение)

№ П/П	Звезда (номер по HD)	H_e	D	Элементы													Тип неукрепности						
				SiI	SiI4200	SiII	Mn	Cr	Sr	Y	Hg	Ga	P	Eu	Ce	Sm	La	Gd	Sc	Co	Mg	по [S, g]	количес- твенный
57	108945	—	—	1.33	—	2.24	1.43	1.37	4.97	1.00	2.08	1.42	1.57	3.52	1.93	1.88	2.00	2.54	0.98	2.08	1.34	Sr	Sr-Eu
58	72968	+480 +740	—	—	1.00	0.60	1.24	2.40	3.26	0.80	1.66	1.88	1.00	1.07	0.94	1.10	1.58	1.45	0.63	—	0.66	Sr	Sr
59	12447	—	0.40	1.63	—	1.69	1.64	1.64	1.43	0.95	2.00	1.64	1.05	3.00	1.68	1.55	2.02	0.73	1.00	0.68	Cr	Eu-Si	
60	452107	+840 +1430 0.39	—	1.46	—	1.26	1.00	0.92	2.92	1.71	—	1.20	—	2.04	1.78	—	0.87	1.50	1.33	1.88	—	Sr	Sr-Eu
61	27962	-460	0.46	1.45	—	1.45	0.56	1.44	0.98	1.40	1.87	1.10	1.48	1.56	1.07	0.94	1.20	1.00	0.94	—	0.92	Am	Am
62	89021	—	0.50	—	—	1.00	1.32	1.00	1.20	1.10	0.96	1.00	1.22	1.00	0.95	0.80	—	1.45	1.14	1.22	1.40	N	N
63	141003	—	—	—	—	1.14	1.60	1.28	0.90	1.23	—	—	—	1.24	0.42	—	—	1.05	1.60	0.75	—	N	N
64	16970	—	—	—	—	0.77	0.70	1.27	0.83	1.06	—	—	—	1.34	1.42	0.68	0.84	—	1.21	—	1.12	N	N
65	111133	-1540 -890	—	1.21	2.06	1.87	2.32	1.61	2.83	0.78	1.65	3.10	1.50	2.61	1.40	1.72	2.20	1.78	0.98	2.50	0.78	Cr-Eu-Sr	Sr-Eu-Si
66	476232	-315 -440	—	1.83	0.98	1.46	1.20	1.07	3.13	1.34	3.47	1.24	1.85	1.80	2.18	1.49	1.18	1.91	0.60	2.50	0.76	Sr	Sr-Eu
67	137422	—	—	1.00	—	1.00	—	1.41	0.67	0.95	1.18	—	—	—	0.90	—	—	1.00	1.28	—	1.24	K CaII	Cr?
68	28319	—	—	0.98	0.54	0.84	1.06	0.68	1.36	0.82	1.40	1.52	—	1.33	2.00	—	1.27	1.41	1.26	—	0.90	Cr-Eu?	Hg
69	45089	—	—	0.56	0.56	0.78	0.54	1.27	3.28	1.18	2.12	1.28	1.25	4.45	2.40	0.83	5.00	1.22	0.72	1.00	1.04	Sr	Sr-Eu
70	20210	-260	—	1.55	1.00	1.16	1.10	1.04	1.11	0.96	1.24	1.15	1.19	1.54	1.10	1.52	1.00	1.01	0.66	1.15	0.68	Ba	Ba?
71	155974	—	0.43	—	—	1.03	1.14	1.43	0.76	1.20	—	—	—	—	1.35	—	—	1.05	—	1.05	—	N	N
72	43151	—	0.43	1.20	—	0.98	0.70	0.76	1.06	0.94	—	—	0.81	0.81	1.06	0.85	—	1.21	0.88	0.85	—	N	N
73	71297	—	—	1.00	1.00	1.00	1.24	0.67	0.98	0.90	1.05	1.08	1.21	1.08	0.83	1.20	1.10	0.72	0.85	1.16	0.77	N	N
74	197461	—	—	0.94	—	0.74	1.20	0.74	1.43	1.31	1.20	1.10	1.00	1.18	1.74	1.28	0.92	1.29	1.10	0.36	0.60	N	N
75	127762	—	—	—	—	1.00	1.13	1.30	1.06	1.21	—	1.00	0.97	0.86	0.93	0.95	—	1.00	0.91	0.80	1.20	N	N
76	201601	+180 +880 0.35	—	1.52	0.45	1.24	1.10	0.98	2.90	1.17	—	0.97	1.35	2.68	1.84	1.30	0.84	2.06	0.65	1.60	1.40	Cr-Eu-Sr	Sr-Eu
77	137909	-960 +1020 0.30	—	—	—	1.04	0.90	1.42	1.46	1.07	1.14	0.92	1.30	2.72	1.96	1.62	0.74	1.52	1.00	—	1.22	Cr-Eu-Sr	Eu
78	98088	-1180 +1000	—	2.00	0.88	1.78	0.80	1.43	1.90	0.93	1.86	0.90	1.93	1.62	0.97	1.57	1.00	1.10	0.54	1.80	0.59	Sr	Sr-Eu-Si
79	110375	-390	0.19	1.00	1.43	0.80	0.96	1.38	0.83	0.97	0.81	1.06	1.10	1.03	0.95	1.06	—	1.00	1.10	1.20	0.84	N	N
80	89025	—	—	—	—	1.05	0.86	0.76	1.02	0.80	1.13	0.96	0.86	1.08	1.10	1.00	—	1.00	1.22	1.20	—	N	N
81	18295	-1270 +1350 0.35	—	1.60	2.40	1.85	1.40	1.95	1.83	2.10	—	—	0.77	2.04	1.16	2.00	1.72	1.10	0.79	—	0.65	Si-Cr-Eu	Si-Sr-Eu
82	224801	—	+2300	1.70	—	2.25	1.54	1.78	2.27	1.36	1.93	—	—	3.16	1.07	1.80	2.00	1.32	1.16	1.48	0.29	Si-Cr-Eu	Si-Sr-Eu
83	112185	—	0.51	1.00	—	0.45	1.32	1.84	1.27	1.44	2.06	1.52	2.10	2.05	0.76	—	—	1.92	0.90	2.00	0.74	Si-Cr	Cr-Eu
84	25291	—	—	1.07	0.66	1.21	0.76	1.03	1.30	1.02	1.00	1.00	1.06	1.18	1.06	0.75	0.82	1.00	0.81	1.06	0.85	N	N

4*

2. Величины P у звезд Ар для некоторых элементов значительно превосходят единицу и в некоторых случаях достигают 3-4.

3. Поскольку значение P , большее единицы на величину, превышающую две вероятные ошибки, действительно (с вероятностью большей 0.82) характеризует усиление интенсивностей линий данного элемента в спектре исследуемой звезды по сравнению со средней интенсивностью линий в спектрах нормальных звезд, то $P > 1$ может количественно определять пекулярность звезды в отношении данного элемента.

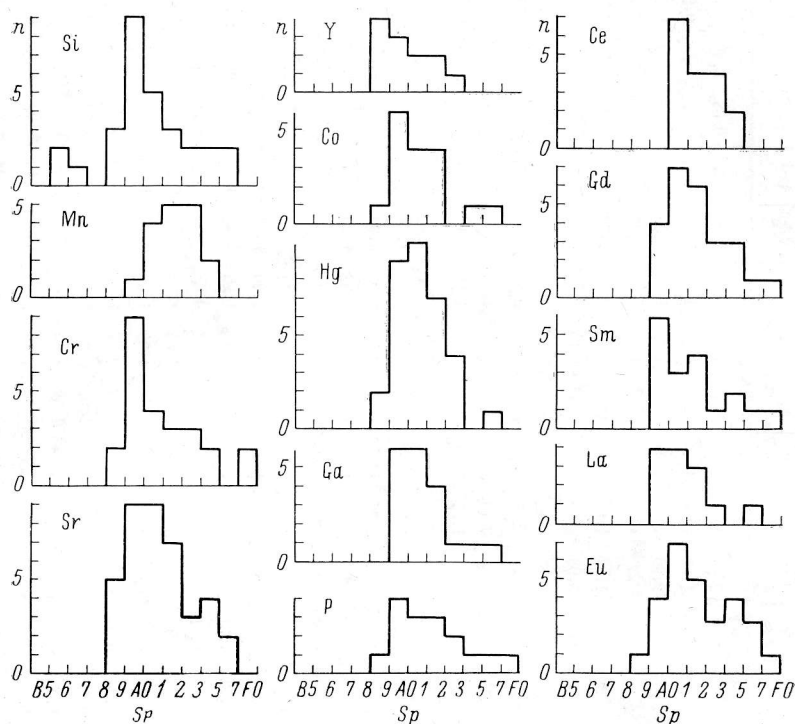


Рис. 3. Гистограммы распределения звезд Ар различных типов пекулярности по спектральным классам (n — число звезд).

4. По величинам P можно более надежно, чем раньше, относить звезды к тем или иным группам пекулярности и выявлять звезды, ошибочно отнесенные к какой-либо группе.

5. На основании анализа величин P можно выделить элементы, действительно являющиеся пекулярными в звездах Ар. Однако для этого необходимо тщательное отождествление и измерение спектральных линий. Это нужно иметь в виду при изучении элементов, имеющих слабые линии, которые могут быть блендированы сильными линиями других элементов.

6. Наиболее важным выводом из анализа зависимостей P — Sp , вероятно, является вывод о непрерывном нарастании пекулярностей от нормальных звезд к звездам Ар (рис. 2). Нет резкой границы по величине между значениями P для нормальных звезд и для звезд Ар. Звезды Ар с пекулярностью какого-либо элемента нельзя четко отделить от нормальных, ибо всегда найдутся звезды, для которых значения P для этого элемента будут промежуточными между значениями P в нормальных и пекулярных звездах. Поэтому представляются маловероятными гипотезы о происхождении пекулярностей в результате каких-то катастрофических процессов.

7. Анализ зависимостей $P-Sp$ позволяет изучить распределение звезд A_p различных типов пекулярности по спектральным классам. Эти распределения представлены на рис. 3.

Общей чертой распределений звезд всех типов является резкий рост числа звезд у В9-А0 при переходе от ранних спектральных классов к более поздним и затем более или менее плавный спад в сторону поздних спектральных классов. Распределение для «кремниевых» звезд имеет максимум у А0, и «кремниевые» звезды находятся практически во всей области спектральных классов от В6 до F0. Распределение «марганцевых» звезд имеет широкий максимум в области А0—А3, и эти звезды практически не наблюдаются у А5. Подобное распределение и

у «ртутных» звезд. Распределения звезд с пекулярностями редкоземельных элементов имеют примерно одинаковый характер — почти полное отсутствие звезд более ранних, чем В9, резкий подъем числа звезд у А0 и плавный спад к F0. Резкое уменьшение числа звезд с пекулярностью линий редкоземельных элементов в сторону более ранних спектральных классов, чем В9, вероятно, обусловлено невозможностью их обнаружения из-за того, что повышение температуры переводит атомы в такие состояния ионизации, при которых атомы не могут поглощать в видимой области спектра. Однако возможно и то, что у звезд этих спектральных классов просто не возникает подобная пекулярность. Исследование спектров звезд в далеком ультрафиолете поможет решить, какое из этих предположений ближе к истине. Это же можно сказать и о распределениях звезд с пекулярностью других элементов (Y, Ga, P, Co).

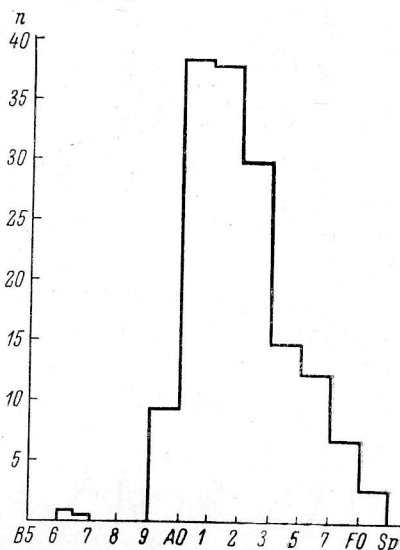


Рис. 4. Гистограмма распределения всех исследуемых звезд A_p по спектральным классам (n — число звезд).

Распределение всех звезд A_p , независимо от типа пекулярности, по спектральным классам (рис. 4) имеет максимум у А1.0. По сравнению с распределением, получаемым при использовании спектральных классов по НД, на нашем распределении максимум смещен от А0 в сторону более поздних классов и более широк (А0—А2).

На рис. 5 приведено распределение числа звезд по величинам P для каждого элемента. Эти распределения наглядно показывают поведение элементов в пекулярных звездах. Все нормальные звезды имеют симметричное распределение относительно $P=1.0$ для всех элементов. Для линий же в спектрах пекулярных звезд максимум, как правило, сдвинут в сторону больших P и имеется «хвост» в распределении звезд. Сдвиг максимума распределения в сторону значений P , больших единицы, и существование звезд с $P \approx 2-5$ свидетельствуют о пекулярности данного элемента.

Необходимо отметить, что величина «хвоста» связана не только с особенностью элемента. Главным образом она связана с величиной эквивалентных ширин линий, по которым вычисляется значение P . Это можно видеть из следующего примера. Если увеличить эквивалентные ширины 0.05 \AA и 0.20 \AA на одну и ту же величину 0.20 \AA , то в первом случае P будет равно пяти $\left(\frac{0.25}{0.05}\right)$, во втором — только двум $\left(\frac{0.40}{0.20}\right)$. И в первом случае величина «хвоста» будет большой, а во втором малой. Но зависимость величины «хвоста» от свойств «пекулярного» элемента, конечно, суще-

ствует. Так, например, для Si, Eu и Sr, для которых суммарные величины ΣW_i^* , используемые при вычислении P , примерно равны, получаются разные максимальные значения P : для Si — 2.6, для Eu — 4.4, для Sr — 5.0. В случае, если основная масса звезд Ар на распределениях по P расположена там же, где и нормальные, поведение данного элемента в нормальных и пекулярных звездах одинаково, и, следовательно, этот элемент

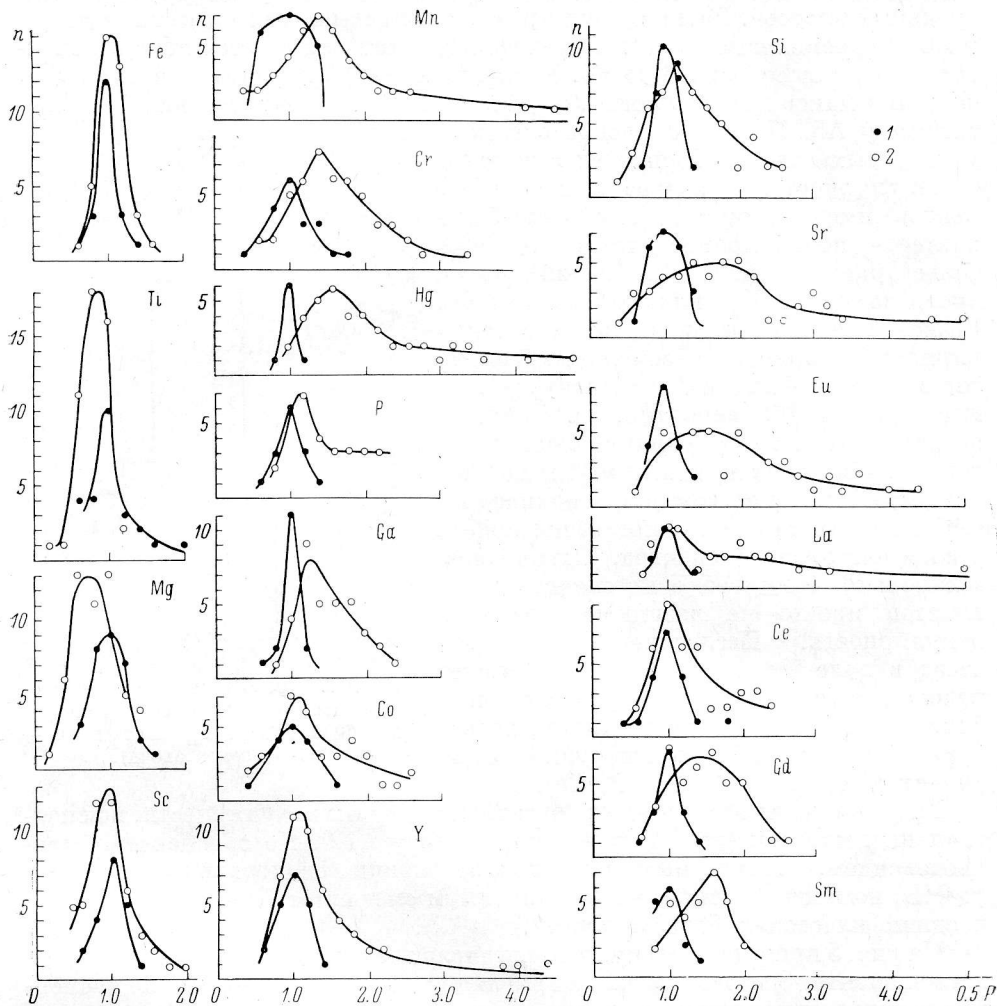


Рис. 5. Распределение числа звезд по величинам P для каждого элемента.

1 — нормальные звезды, 2 — пекулярные звезды.

«нормален». Это можно сказать о Fe, Ti, Sc и Mg. Однако и у этих элементов обнаруживаются небольшие аномалии. Так, максимум распределения звезд по P для железа смещен к $P=1.1$, т. е. линии железа (для данного спектрального класса) слегка усилены в звездах Ар. Максимум распределения для титана смещен к $P=0.9$, т. е. линии титана слегка ослаблены. Эти смещения — результат усреднения спектрального класса, определенного по Fe и Ti. Распределение для Mg, как и диаграмма $P(\text{Mg})\text{—Sr}$, свидетельствует о небольшом ослаблении линий Mg в звездах Ар. По виду распределения к «нормальным» элементам можно отнести Sc. Остальные из исследуемых элементов можно с полной уверенностью считать «пекулярными».

§ 5. СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН P МЕЖДУ СОБОЙ

При составлении программы этой работы предполагалось, оценив количественно «степень пекулярности» звезды в отношении различных элементов, получить одно, обобщенное значение «степени пекулярности», характеризующее весь спектр звезды в целом. Однако, как выяснилось в результате нашего исследования, это оказалось невозможным. Звезда, имеющая пекулярности в отношении различных элементов, имеет неодинаковые значения P для каждого из них. Эти значения P не сравнимы между собой в том смысле, что не обязательно большее значение P для одного

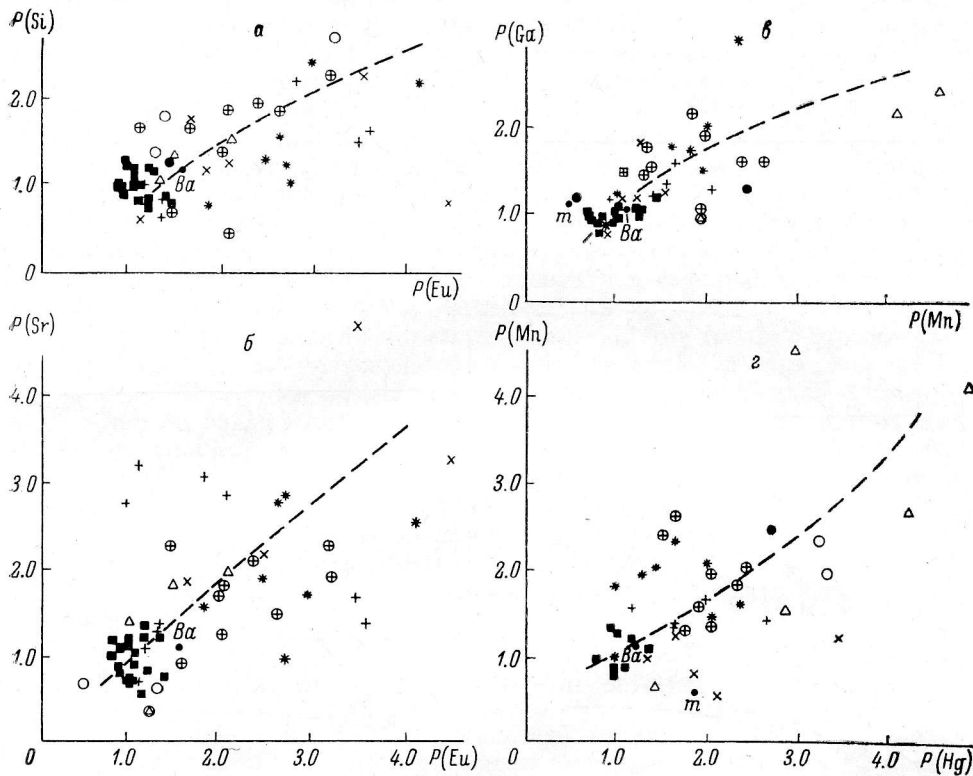


Рис. 6. Сопоставление величин P для различных элементов одной и той же группы между собой.

Обозначения те же, что и на рис. 2. a — для Si и Eu, b — для Sr и Eu, c — для Ga и Mn, z — для Mn и Hg.

элемента по сравнению с другим означает и большую пекулярность звезды в отношении этого элемента. Точно так же одна и та же величина P для различных элементов не свидетельствует о равенстве пекулярностей звезды в отношении этих элементов. Все это имеет место и в случае величин P , полученных для одного и того же элемента у звезд различных спектральных классов.

Это связано с тем, что при малой W_λ увеличение ее, например, вдвое, обуславливается таким же (в два раза) увеличением числа атомов N_i в атмосфере звезды (так как при этом $W_\lambda \sim N_i$). Этот случай имеет место для звезд самых ранних спектральных классов в изучаемом диапазоне. При большой же W_λ подобное увеличение эквивалентной ширины (и, следовательно, P) может быть вызвано только гораздо большим увеличением

числа атомов (так как при этом $W_\lambda \sim \sqrt{\lg N_i}$). Такой эффект можно назвать эффектом кривой роста. Ввиду наличия этого эффекта лучше было бы исследовать peculiarity химического состава атмосфер звезд Ар с помощью методов количественного анализа спектров (кривая роста, модель). Однако эти методы (кривых роста, модели) в данном случае нерациональны, так как они трудоемки, требуют измерения большого числа

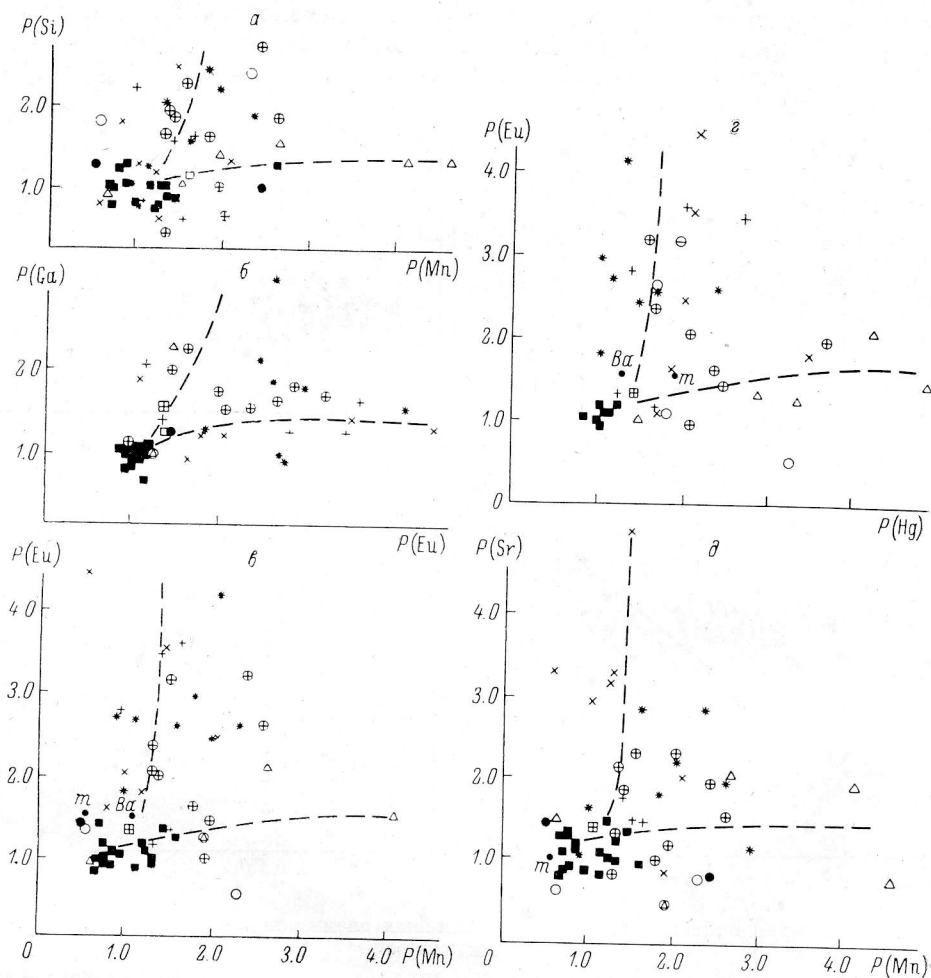


Рис. 7. Сопоставление величин P для различных элементов разных групп между собой.

Обозначения те же, что и на рис. 2. a — для Si и Mn, $б$ — для Ga и Eu, $в$ — для Eu и Mn, $г$ — для Eu и Hg, $д$ — для Sr и Mn.

линий (в то время как некоторые элементы имеют в исследуемой спектральной области одну—две линии), а для исследования редкоземельных элементов этими методами необходимо знание сил осцилляторов, которых известно очень мало.

Вследствие этого для статистических исследований целесообразно использовать предложенные нами величины P , несмотря на то что эти величины трудно сравнимы между собой. Эффект кривой роста может быть одной из причин того, что peculiarity не обнаруживается у звезд более позднего спектрального класса, чем F0 (необходимы очень большие из-

бытки в химическом составе, которые могли бы дать заметное увеличение интенсивности линий в спектрах звезд, спектральные классы которых позже F0).

В случае установления связи между величинами P , их можно было бы свести в одну систему, а затем вывести общую «степень пекулярности» звезды. Для выявления этой связи величины P были сопоставлены друг с другом (см. рис. 6, 7). К сожалению, связь между величинами P для различных элементов настолько нечеткая, что можно выявить лишь одну наиболее общую тенденцию, заключающуюся в том, что с возрастанием пекулярности звезды в отношении одного элемента растет пекулярность и в отношении другого. Однако и эта тенденция сильно маскируется разбросом. По поведению величин P при сопоставлении их друг с другом «пекулярные» элементы можно разделить на две группы: группа марганца, к которой можно отнести Mn, Hg, Ga, P и, вероятно, Cr; группа редкоземельных элементов, к которой кроме Eu, Ce, Sm, La, Gd можно, вероятно, присоединить Si и Sr. Сопоставление P для элементов, относящихся к одной группе, показывает, что с ростом значения P для одного элемента растет и значение для другого. Примером этого могут служить зависимости $P(\text{Si})-P(\text{Eu})$, $P(\text{Sr})-P(\text{Eu})$, $P(\text{Ga})-P(\text{Mn})$, $P(\text{Mn})-P(\text{Hg})$. При сопоставлении P для элементов разных групп обнаруживается, кроме возрастания величины P для одного элемента с увеличением величины для другого, еще разделение зависимости на две последовательности, почти параллельные осям координат (см. рис. 7), что говорит о независимости величин P для элементов одной группы от величин P для элементов другой (зависимость есть, но она гораздо слабее, чем внутри одной группы). Таким образом, связи между величинами P довольно сложны, к тому же они сильно маскируются разбросом. Возможно, что здесь все же существуют четкие зависимости, проявлению которых мешают физические механизмы, влияющие на эквивалентные ширины линий.

Поскольку величины P для различных элементов свести в одну систему не удается, нами было решено считать звезду пекулярной в отношении данного элемента, если P для этого элемента больше единицы на две вероятные ошибки (2ϵ).

§ 6. СОПОСТАВЛЕНИЕ P С ВЕЛИЧИНОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Одной из наиболее важных особенностей пекулярных звезд является наличие в их атмосферах мощных магнитных полей. Естественно предположить, что пекулярность в интенсивностях линий каким-то образом связана с магнитным полем. Однако до сих пор, несмотря на многочисленные исследования, эта связь не была обнаружена. На наш взгляд, одной из основных причин этого являлось отсутствие количественных критериев оценки пекулярности.

Имея величины P для различных элементов, мы попытались выяснить связь пекулярности с магнитным полем. Было проведено сопоставление P с абсолютной величиной экстремального значения напряженности магнитного поля ($|\text{extr } H_e|$) и с амплитудой изменения H_e (если по измерениям поле звезды имеет одну полярность, то «амплитудой» считалась наибольшая величина напряженности поля этой полярности). Характер зависимостей в обоих случаях одинаков, однако в первом случае зависимость оказалась более четкой. Это, вероятно, может свидетельствовать о том, что для наличия пекулярностей в звездах Ар важна мощность поля, которая характеризуется абсолютной величиной напряженности, а знак его не имеет значения. Нужно отметить, что из-за того, что величина P определяется не только пекулярностью, но и физическими условиями атмосфер (см. выше), зависимости P от $|\text{extr } H_e|$ имеют самый общий характер.

Наиболее четкая связь между P и $|\text{extr } H_e|$ обнаруживается при сопоставлении этих величин для звезд, расположенных в интервале спектральных классов, где число звезд с наибольшими значениями данных P достигает максимума. Поэтому на диаграмме Герцшпрунга—Рессела для звезд Ар были выбраны именно такие интервалы спектральных классов и для звезд, находящихся в них, были построены исследуемые зависимости (рис. 8).

Для увеличения числа точек на зависимостях $P-|\text{extr } H_e|$ были использованы нормальные звезды. Эти звезды с малыми скоростями вращения ($v \sin i \approx 0-40$ км/сек.) по измерениям имеют нулевую напряженность поля. Сказать определенно, что нормальные звезды с большими скоростями вращения также имеют $H_e=0$, мы не можем, однако это весьма вероятно. Поэтому все нормальные звезды должны располагаться около нуля по оси $|\text{extr } H_e|$.

Полученные зависимости $P-|\text{extr } H_e|$ можно грубо разделить на три вида.

1. Величина P не зависит от $|\text{extr } H_e|$ (или эта зависимость не выяв-

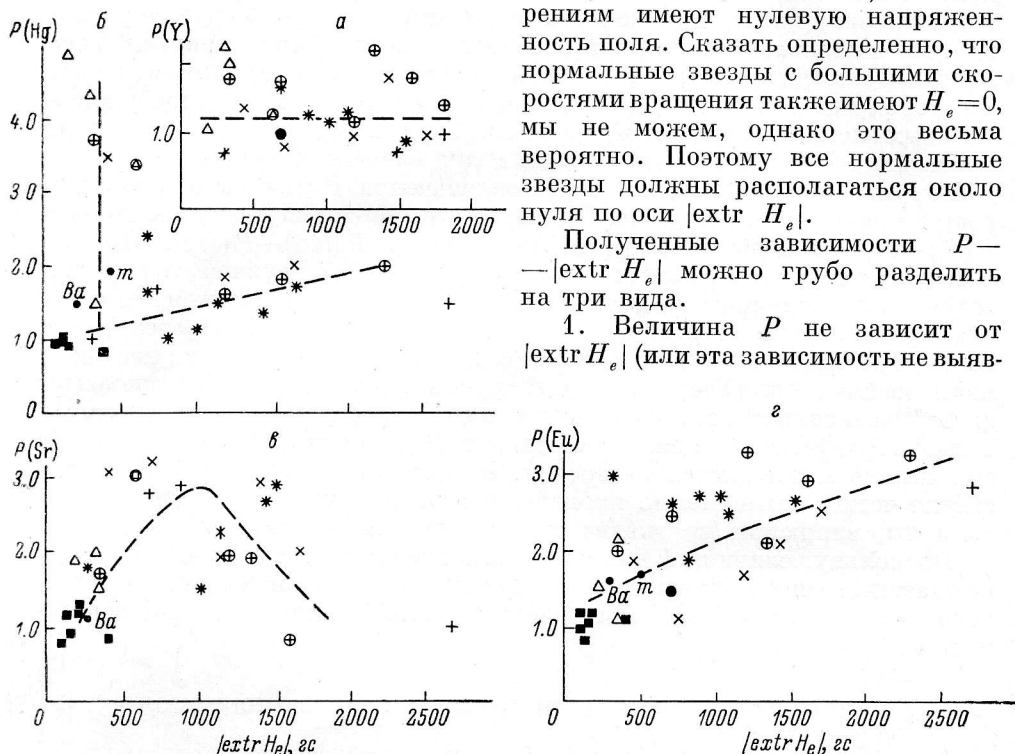


Рис. 8. Сопоставление величин P для различных элементов с $|\text{extr } H_e|$.
Обозначения те же, что и на рис. 2. а — для Y, б — для Hg, в — для Sr, г — для Eu.

ляется из-за большого разброса). Примером могут быть зависимости для Y и Ga. Сюда же, вероятно, нужно отнести зависимости для Hg и Mn. Однако для этих элементов картина сложнее. Часть звезд (в основном «марганцевые») с $|\text{extr } H_e| \approx 450$ гс имеет значения $P(\text{Hg})$ и $P(\text{Mn})$ от 1 до 4 и располагается в плоскости $P-|\text{extr } H_e|$ на прямой, параллельной оси P . Для остальных звезд с ростом $|\text{extr } H_e|$ от 0 до 1500 гс P меняется примерно от 1 до 2.

2. Зависимость $P-|\text{extr } H_e|$ имеет максимум при $|\text{extr } H_e| \approx 1000$ гс. Примером могут быть зависимости для Si, Sr, Cr.

3. Величина P плавно возрастает с ростом $|\text{extr } H_e|$. Загиба в сторону меньших P при больших значениях $|\text{extr } H_e|$, как на зависимостях второго вида, нет. Редкоземельные элементы (Eu, Ga, La) дают третий вид зависимости. Интересной особенностью обладает зависимость $P-|\text{extr } H_e|$ для La. От $|\text{extr } H_e|=0$ до, примерно, 1000 гс $P(\text{La})$ остается в среднем постоянной, а начиная с $|\text{extr } H_e| \approx 1000$ гс $P(\text{La})$ растет.

В заключение о зависимостях $P - |\text{extr } H_e|$ можно сказать, что, несмотря на то что все эти зависимости сильно маскируются разбросом и выводы об их частных особенностях следует считать предварительными, общая тенденция роста P с увеличением $|\text{extr } H_e|$ не может вызывать сомнений.

§ 7. СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН P С ВЕЛИЧИНОЙ БАЛЬМЕРОВОГО СКАЧКА

Известно, что у звезд Ар значения бальмеровского скачка (D) меньше, чем у нормальных звезд того же спектрального класса. Вероятно, это уменьшение каким-то образом связано с другими особенностями звезд Ар (аномалии структуры атмосферы, аномальное усиление линий, наличие

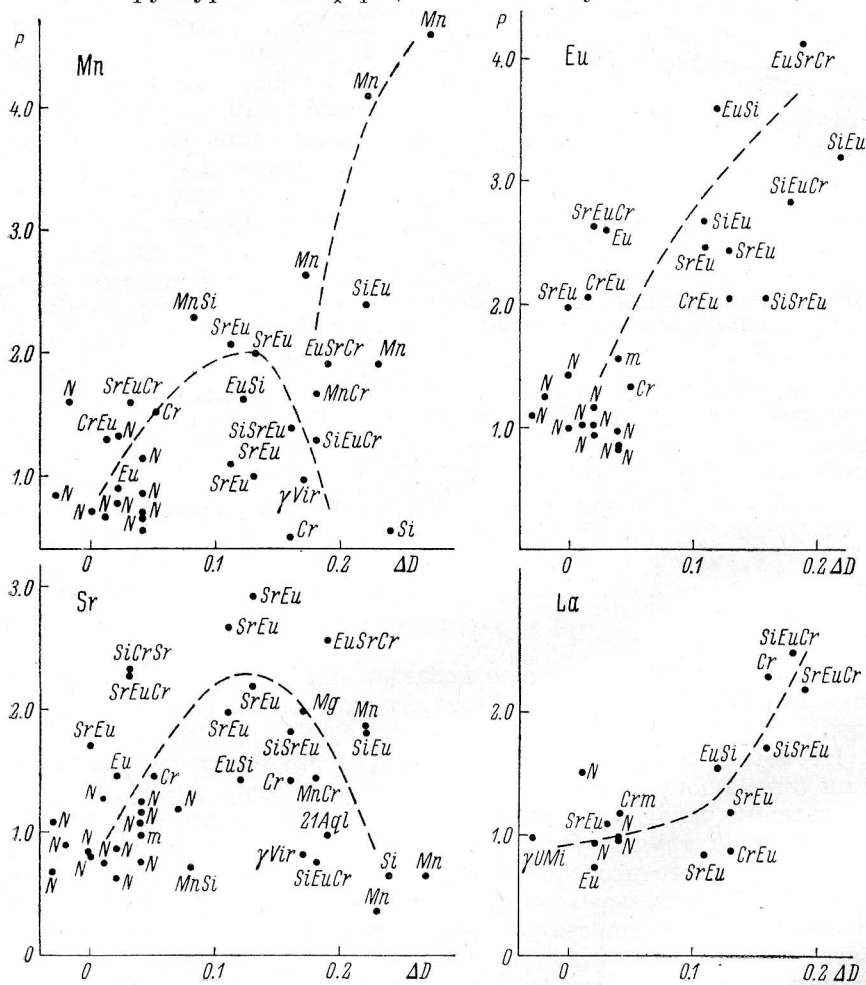


Рис. 9. Сопоставление величин P с ΔD для элементов Mn, Sr, Eu и La. Обозначенный у точек тип пекулярности определен количественно (см. табл. 2).

магнитных полей). Нами сделана попытка сопоставить величины отклонения бальмеровского скачка (ΔD) для пекулярных звезд (по отношению к нормальному) с величиной P для различных элементов.

Величина ΔD определялась из разности: $\Delta D = D^N - D^*$, где D^* — бальмеровский скачок для данной звезды, а D^N — значение бальмеровского

скачка, снятое со средней кривой зависимости D от спектрального класса для нормальных звезд [10]. Зависимости P от ΔD (рис. 9) во многом аналогичны зависимостям P от $|\text{extr } H_e|$. Здесь также имеется тенденция роста P с увеличением ΔD . Причем для редкоземельных элементов (Eu, Ce, Sm, La, Ga) возрастание P с ΔD постоянно, а для остальных элементов имеется максимум у $\Delta D=0.1$, после чего значения P начинают уменьшаться.

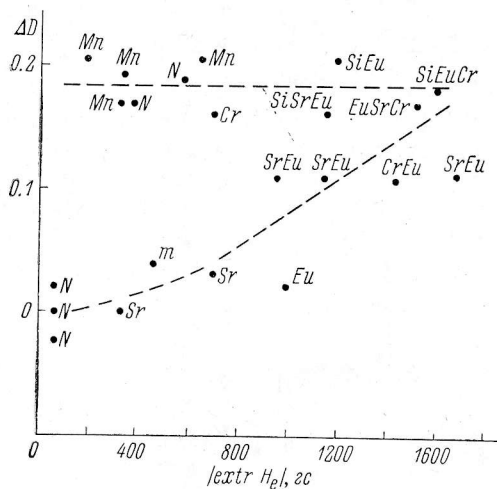


Рис. 10. Зависимость между ΔD и $|\text{extr } H_e|$ для звезд различных типов.

Наличие количественных определений спектральных классов позволило сопоставить ΔD непосредственно с $|\text{extr } H_e|$. К сожалению, для этого сопоставления очень мало точек (необходимо для каждой звезды знать одновременно D , H_e и количественный спектральный класс). Зависимость ΔD — $|\text{extr } H_e|$ представлена на рис. 10. При рассмотрении рис. 9 и 10 можно заметить, что в обоих случаях, при сопоставлении ΔD и с P и с $|\text{extr } H_e|$, «марганцевые» звезды не подчиняются

тем же закономерностям, что и остальные звезды Ар. Возможно, это вызвано тем, что для «марганцевых» звезд ΔD завышены. Поскольку эти звезды имеют в основном ранние спектральные классы, в области которых D изменяются гораздо круче, чем в области спектральных классов других звезд Ар, то небольшой сдвиг при определении спектральных классов для «марганцевых» звезд в сторону более поздних спектральных классов дает большие значения ΔD .

§ 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение и статистическое исследование количественных характеристик пекулярности спектров звезд Ар позволяют сделать следующие выводы.

1. Несмотря на то что величины P определяются не только пекулярностями (выделяющими звезды Ар в отдельный тип) атмосфер звезд, но и физическими условиями (разными для каждой атмосферы) и влияние последних на P трудно учесть, величины P могут быть использованы для разностороннего исследования пекулярностей в спектрах звезд Ар.

2. Непрерывность перехода от нормальных звезд к пекулярным на зависимостях P — Sp может свидетельствовать о том, что развитие аномалий в химическом составе или в строении атмосфер звезд класса А, приводящее к появлению звезд типа Ар, происходит в результате каких-то изменений свойств атмосфер при медленной эволюции звезд, а не как следствие катастрофы.

3. «Пекулярные» элементы (т. е. элементы, линии которых усилены в спектрах звезд Ар) можно грубо разделить на две группы. К первой относятся Mn, Hg, Ga, P и, вероятно, Cr; ко второй группе — редкоземельные элементы, а также Si и Sr. Внутри каждой из этих групп с увеличением пекулярности звезды Ар в отношении какого-либо элемента растет пекулярность и в отношении другого. В то же время при сопоставлении величин P , характеризующих пекулярности в отношении элементов разных

групп, зависимости разделяются на две ветви (на графиках $P-P$), почти параллельные осям координат, что свидетельствует о независимости сопоставляемых величин друг от друга.

4. Исследование зависимостей P от $|\text{extr } H_e|$ позволяет заключить, что магнитное поле, по-видимому, оказывает существенное влияние на величину P . Следовательно, теории, объясняющие происхождение звезд Ар, должны учитывать роль магнитного поля в появлении и сохранении особенностей химического состава и структуры атмосфер этих звезд.

5. Сопоставление P с величиной ΔD свидетельствует о том, что, возможно, аномальность структуры атмосферы (наблюдаемой характеристикой которой может служить ΔD) также связана с особенностями химического состава атмосфер звезд Ар.

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что выводы, полученные на основании сопоставления величин P с другими характеристиками звезд Ар, из-за большого влияния на P различных эффектов, следует считать предварительными.

Автор глубоко признателен И. М. Копылову за ценные указания при выполнении данной работы и И. В. Ушмаевой за помощь в вычислениях и построении графиков.

Литература

1. В. В. Леушин, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 43, 1971.
2. В. М. Щиголов. Математическая обработка наблюдений. «Наука», М., 1969.
3. Н. Меррил. Линии химических элементов в астрономических спектрах. Физматгиз, М., 1959.
4. W. P. Bidelman. Abundance Determinations in Stellar Spectra. Ed. by H. Hubenot, Academic Press, N. Y. and London, 229, 1966.
5. D. M. Mihalas, J. L. Henshaw, Astrophys. J., 144, 25, 1966.
6. Н. В. Вабсоок, Astrophys. J. Suppl. Ser., 3, No. 30, 1958.
7. Ю. В. Глаголевский. Спектрофотометрическое исследование непрерывных спектров магнитных и пекулярных звезд. Канд. дисс., 1966.
8. С. Jасhek, М. Jасhek, Z. Astrophys., 45, 35, 1958.
9. К. Oсаwа, Ann. Tokyo astr. Obs., 9, No. 3, 1965.
10. L. X. Aller. Astrophysics. V. I. The Atmospheres of the Sun and Stars. N. Y., 1963.

Декабрь 1969 г.