

АНАЛИЗ АТМОСФЕР МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД МЕТОДОМ КРИВЫХ РОСТА

II. З В Е З Д Ы 10 Aq1, ι CrB

Ю. В. Глаголевский

Атмосферы звезд 10 Aq1 и ι CrB исследуются методом кривых роста. Определены микротурбулентные скорости, электронные плотности, температуры возбуждения и ионизации. Скорости микротурбулентности $v_t \approx 2$ км/сек., электронные плотности нормальны, полученные температуры соответствуют более ранним спектральным классам, чем дается системой HD.

The atmospheres of the stars 10 Aq1 and ι CrB have been investigated by using the curve-of-growth method. Microturbulent velocities, electron densities, excitation temperatures, and ionization temperatures are determined. The velocities of microturbulence $v_t \approx 2$ km/s, the electron densities are normal, the obtained temperatures correspond with the earlier spectral classes than those in the HD system.

§ 1. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Настоящая работа является продолжением работы [1], в которой приведены результаты обработки той же методикой спектрограмм звезд 41 Tau, 21 Peg и ι Cas. Спектрограммы звезд 10 Aq1 и ι CrB получены в Крымской астрофизической обсерватории В. В. Леушиным на 122-сантиметровом

ТАБЛИЦА 1

Звезда	Область спектра (Å)	Количество спектрограмм
10 Aq1	3740—4400	2
	3690—4400	2
ι CrB	3730—4435	1
	3830—4525	1

рефлекторе (дисперсия 15 Å/мм). Основные данные о наблюдательном материале приведены в табл. 1.

Для ι CrB имелось только две спектрограммы. Для построения кривых роста с достаточной точностью этого материала мало, поэтому были использованы эквивалентные ширины W_λ линий из [2], которые

мы усреднили с нашими. В указанной работе изучалась более широкая спектральная область, чем охватывают наши спектрограммы, но мы включили в анализ и эти данные, приведя их к единой системе W_λ с помощью графика, построенного по общим линиям. В работе [2] эквивалентные ширины линий получены на основании измерений спектрограмм с дисперсией 40 Å/мм (три спектра) и 13 Å/мм (три спектра).

В табл. 2 приведены некоторые сведения об изучаемых звездах.

Обозначения в таблице: Sp (HD) — спектральный класс в системе HD, Sp (H) — спектральный класс, полученный по интенсивностям линий водорода, Sp (M) — то же по линиям металлов, Sp (K) — то же по линии K

ТАБЛИЦА 2

Звезда	Sp (HD)	Sp (H)	Sp (M)	Sp (K)	Sp (He)	φ_1	φ_2	D	Пределы изменения напряженности магнитного поля (гс)	$v \sin i$ (км/сек.)	Особенность	
10 Aq1	A4p	A5	F0	F0	—	—	—	—	-315	+400	10	Mn, Sr, Eu
† CrB	A0p	B8	—	B9	B9.5	1.12	1.24	0.30	-340	+75	10	Mn, Si, Sr, Zr, Y

ионизованного кальция, Sp (He) — то же по линиям гелия [3]. Спектрофотометрические градиенты φ_1 , φ_2 и бальмеровский скачок D взяты из [4]. Величины магнитного поля получены Бэбкоком [5]. Скорость осевого вращения $v \sin i$ для † CrB взята из [6]. Звезде 10 Aq1 мы приписали ту же скорость вращения, что и у † CrB, на основании того, что, по измерениям Бэбкока [5], полуширины линий в ее спектре такие же, как у † CrB. В последней графе указаны элементы, спектральные линии которых имеют аномальные интенсивности в спектре звезды.

Спектрограммы звезд промерены В. В. Леушиным на микрофотометре прямых интенсивностей Крымской астрофизической обсерватории. Эквивалентные ширины линий определялись «методом треугольников», как и в нашей предыдущей работе. По отдельным неблендированным линиям сначала строился график зависимости $\lg\left(\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6\right)$ от логарифма центральной глубины линии $\lg R_0$, затем по этому графику определялись величины $\lg\left(\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6\right)$ для остальных линий. Данные определения этих величин приведены в табл. 3. В этой таблице содержатся только те данные, которые использовались для построения кривых роста и определения необходимых параметров атмосфер звезд. Результаты определения величин $\lg\left(\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6\right)$ для линий остальных элементов будут опубликованы в работе, посвященной изучению химического состава атмосфер магнитных звезд.

§ 2. ТУРБУЛЕНТНЫЕ СКОРОСТИ. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПЛОТНОСТИ

В настоящей работе, как и в [1], применялась теоретическая кривая роста Унзоляда. Эмпирические кривые роста строились по мультиплетам, имеющим достаточное количество линий с измеренными W_λ . Затем все такие кривые как для нейтральных, так и для ионизованных элементов были сведены в одну (см. рисунок). Вообще говоря, между кривыми роста для нейтральных и ионизованных элементов существует небольшая разница в вертикальном сдвиге, но из-за значительного разброса точек она определяется неуверенно. Разброс получается в основном вследствие заметного блендирования линий. Этот вывод можно сделать на основании того, что интенсивность каждой линии измеряется с ошибкой меньшей, чем наблюдаемый разброс.

Необходимые для применения метода кривых роста величины наибольших глубин R_0 линий приведены в табл. 4.

На основании измерения вертикального сдвига эмпирических кривых роста получены микротурбулентные скорости v_t в км/сек. (см. табл. 4). Для сравнения укажем, что по данным из [7] для 10 Aq1 $v_t = 2.14$ км/сек.

По номеру последней наблюдаемой водородной линии (n_m) были определены электронные плотности ($\lg n_e$). Данные о номере последней наблюдаемой водородной линии для † CrB взяты из [2]. Величину n_m предварительно следует исправить за вращение звезды [8], однако поправка при $v \sin i = 10$ км/сек. близка к нулю. Значения $\lg n_e$ (с учетом поправок для перехода от ионной к электронной плотности [9]) представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 3

Длина волны λ (Å)	Номер мульти- плета	$\lg \left(\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6 \right)$		Длина волны λ (Å)	Номер мульти- плета	$\lg \left(\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6 \right)$	
		10 Aql	CrB			10 Aql	CrB
Fe I				4071.74	43	1.05	0.59
4383.55	41	1.06	1.25	4070.77	558	0.70	—
4375.93	2	0.90	—	4067.99	559	0.87	—
4367.91	41	0.93	—	4063.59	43	1.12	0.94
4367.58	414	0.65	—	4062.45	359	0.75	—
4325.77	42	—	1.30	4059.73	764	0.37	—
4307.91	42	1.32	—	4058.23	558	0.96	—
4299.24	152	1.13	—	4049.34	218	0.35	—
4294.13	41	0.82	—	4045.82	43	1.32	0.79
4285.44	597	0.50	—	4040.65	655	0.62	—
4282.41	71	0.89	0.97	4024.73	560	0.90	—
4271.76	42	1.11	0.63	4021.87	278	0.73	—
4271.16	152	0.86	0.42	4017.16	560	0.76	—
4268.74	649	0.77	—	4009.72	72	0.67	—
4267.83	482	—	0.44	4005.25	43	1.24	0.67
4264.22	692	0.19	—	4001.67	73	0.63	—
4260.48	152	0.97	1.22	4000.47	426	0.70	—
4250.79	42	0.98	0.86	3997.40	278	1.02	—
4250.12	152	0.75	0.78	3994.12	526	0.82	—
4248.23	482	0.76	—	3956.68	278	1.29	—
4247.43	693	—	0.69	3948.77	604	1.24	0.43
4245.24	352	0.73	—	3947.00	561	0.79	0.37
4239.80	18	0.89	—	3930.30	4	—	0.90
4239.01	274	—	0.58	3927.92	4	0.54	—
4235.94	152	0.98	0.98	3922.90	4	1.16	—
4232.73	3	0.30	—	3920.84	567	—	0.39
4227.42	693	1.17	0.72	3920.26	4	—	0.74
4225.46	693	—	0.40	3910.99	284	0.79	—
4222.22	152	0.66	0.18	3902.95	45	—	0.65
4219.36	800	0.77	—	3899.71	4	—	0.68
4217.55	698	0.80	—	3878.58	4	1.45	0.85
4216.19	3	1.09	—	3876.04	22	0.85	—
4213.65	355	0.71	—	3875.76	175	0.68	—
4210.36	152	0.49	0.58	3872.50	20	1.11	1.00
4208.61	689	0.60	—	3871.75	429	0.90	—
4202.03	42	1.00	0.43	3869.59	284	0.81	—
4200.93	689	0.76	—	3867.92	221	0.36	—
4199.10	522	—	0.95	3867.22	488	0.26	—
4198.31	152	1.18	0.87	3866.98	358	0.94	—
4196.22	693	0.79	—	3865.53	20	1.05	0.90
4187.80	152	1.00	0.58	3863.74	250	0.72	—
4187.04	152	1.00	0.40	3859.91	4	1.01	0.80
4181.76	354	1.09	—	3852.57	73	0.60	—
4172.13	694	1.16	—	3850.82	22	0.77	—
4158.80	695	1.01	—	3849.97	20	0.87	—
4157.79	695	0.80	—	3845.17	124	0.85	—
4156.80	357	0.90	—	3825.85	2	1.16	—
4154.50	355	1.10	—	3824.45	4	1.02	0.88
4153.90	695	1.05	—	3820.43	20	1.28	—
4152.17	18	0.93	—	3815.84	45	1.40	0.62
4150.26	695	0.78	—	Fe II			
4147.67	42	0.69	—	4583.83	38	—	1.23
4143.87	43	1.12	0.59	4582.84	37	—	0.98
4143.42	523	0.53	—	4576.33	38	—	0.82
4137.00	726	0.77	0.94	4555.89	37	—	1.06
4133.87	696	0.83	—	4541.52	38	—	0.96
4132.06	43	1.06	0.40	4522.63	38	—	1.20
4122.00	765	—	—	4520.23	37	—	0.89
4083.78	627	—	0.44	4515.34	37	—	1.18
4073.76	558	0.40	—				

Т А Б Л И Ц А 3 (продолжение)

Длина волны λ (Å)	Номер мульти- плета	$\lg\left(\frac{W\lambda}{\lambda} \cdot 10^6\right)$		Длина волны λ (Å)	Номер мульти- плета	$\lg\left(\frac{W\lambda}{\lambda} \cdot 10^6\right)$	
		10 Aq1	CrB			10 Aq1	CrB
4508.28	38	—	1.17	4418.34	51	—	0.64
4491.40	37	—	1.17	4411.08	115	—	0.70
4489.19	37	—	0.91	4409.52	61	—	0.45
4416.82	27	—	1.15	4399.78	51	0.66	0.87
4413.60	32	—	0.75	4398.31	61	0.30	—
4385.38	27	1.11	1.20	4395.85	61	0.87	0.81
4384.30	32	1.08	1.18	4395.03	19	0.84	1.16
4369.40	28	0.88	0.77	4394.06	51	0.66	0.70
4351.76	27	—	1.23	4386.86	104	0.85	—
4321.34	220	—	0.93	4367.66	104	—	0.93
4314.25	32	0.71	0.75	4350.83	94	—	0.83
4303.17	27	0.93	1.12	4330.71	41	—	0.74
4296.57	28	0.96	1.07	4320.96	41	—	0.82
4278.13	32	0.48	0.70	4316.81	94	0.57	—
4273.32	27	0.78	0.83	4314.98	41	0.13	0.99
4258.16	28	0.81	0.84	4312.86	41	0.91	0.91
4233.16	27	1.10	1.28	4307.90	41	—	1.12
4211.80	21	0.40	—	4301.93	41	0.98	0.94
4178.87	23	1.02	1.13	4300.05	41	1.18	1.15
4177.70	21	1.12	—	4294.10	20	0.82	0.87
4173.45	27	—	1.12	4190.23	41	1.30	—
4138.40	39	0.65	—	4187.89	20	0.80	—
4128.74	27	0.98	0.97	4171.90	105	1.17	0.75
4122.64	28	—	0.89	4163.64	105	—	1.04
4061.79	189	—	0.20	4084.33	21	0.92	—
4048.83	172	0.90	0.93	4074.03	105	0.95	—
4044.01	172	0.70	0.57	4063.64	105	0.85	—
4031.46	151	—	0.34	4061.50	21	1.20	—
4024.55	127	—	0.85	4053.81	87	1.00	0.78
4007.72	189	0.82	—	4028.33	87	0.63	0.66
4002.55	190	—	0.78	4025.13	11	0.76	0.71
4002.07	29	0.78	0.77	4012.37	11	1.07	0.95
3945.21	3	—	0.65	3982.00	11	0.96	—
3938.97	190	—	1.04	3914.58	12	1.58	—
3938.29	3	—	0.65	3913.46	34	1.12	0.88
3935.94	173	—	0.83	3900.55	34	—	0.88
3914.48	3	0.93	—	3814.58	12	1.21	0.64
3906.04	173	—	0.86	3761.32	13	1.35	—
3845.18	127	0.85	0.92	3759.29	13	1.33	—
3824.91	29	1.08	—	3757.68	72	1.17	—
3814.12	153	—	1.03	3741.63	72	1.02	—
Ti I				Cr I			
4552.45	42	—	0.67	4371.28	22	0.50	—
4535.57	42	—	0.82	4363.13	103	0.72	—
4518.02	42	—	0.53	4362.95	82	0.69	—
4305.91	44	—	0.91	4359.63	22	0.93	—
4287.40	44	—	0.80	4282.72	1	1.03	0.07
Ti II				Cr II			
4571.97	82	—	1.02	4274.80	1	0.94	0.20
4563.76	50	—	0.85	4254.35	1	1.02	0.28
4533.97	50	—	1.12	4197.23	249	0.33	—
4501.27	31	—	1.24	4169.84	278	0.68	—
4488.32	115	—	1.02	3902.95	23	1.01	—
4468.49	31	—	1.35	3894.04	23	0.93	—
4464.46	40	—	0.75	Cr II			
4443.80	19	—	1.10	4634.11	44	—	0.70
4421.95	93	—	0.36	4618.83	44	—	0.83
				4616.64	44	—	0.88

ТАБЛИЦА 3 (продолжение)

Длина волны λ (Å)	Номер мульти- плета	$\lg \left(\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6 \right)$		Длина волны λ (Å)	Номер мульти- плета	$\lg \left(\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6 \right)$	
		10 Aql	† CrB			10 Aql	† CrB
4592.09	44	—	0.41	Mn I			
4588.21	44	—	0.93	4281.10	23	0.27	—
4558.66	44	—	1.10	4079.42	5	1.03	—
4555.02	44	—	0.97	4058.93	5	1.98	—
4284.21	31	0.53	0.95	4041.36	5	0.87	0.50
4275.57	31	0.73	0.84	4035.73	5	1.01	—
4269.28	31	0.77	0.70	4034.49	2	0.83	0.45
4261.92	31	0.68	0.84	4033.07	2	1.17	0.70
4256.16	192	0.39	—	4030.76	2	1.32	—
4252.62	31	0.59	0.63	4018.10	5	0.96	—
4242.38	31	0.86	1.05	Mn II			
4209.02	162	0.77	—	4326.76	6	—	1.12
4207.35	26	0.69	0.34	4292.26	6	0.73	0.85
4195.41	161	0.90	0.54	4284.41	6	0.70	—
4170.86	18	1.10	—	4283.77	6	—	0.57
4151.01	163	0.77	0.43	4259.20	7	—	0.72
4145.77	162	0.73	0.45	4253.02	7	0.48	0.79
4086.14	26	—	0.29	4244.26	7	0.13	0.16
4082.30	165	0.44	0.50	4238.79	2	—	0.61
4076.87	19	—	0.48	4206.40	7	0.41	0.94
4075.63	19	0.81	—	4205.37	2	0.77	—
4072.56	26	0.64	—	Mg I			
4054.11	19	—	0.77	4167.27	15	1.18	—
4051.97	19	0.42	0.22	4057.51	16	1.21	—
4038.00	194	—	0.17	3986.75	17	1.16	—
4012.50	183	—	0.96	3838.29	3	—	1.00
4003.33	194	0.78	0.85	3832.30	3	—	0.85
Si I				3829.36	3	—	0.95
3905.53	3	—	0.91	Mg II			
Si II				4481.33	4	1.27	1.96
4130.88	3	1.18	1.50	4433.99	9	0.83	0.95
4128.05	3	0.97	1.42	4428.00	9	—	0.63
3862.59	1	0.88	1.32	4390.56	10	0.58	1.06
3856.02	1	1.26	1.39	4384.64	10	0.98	—
3853.66	1	0.74	1.14				

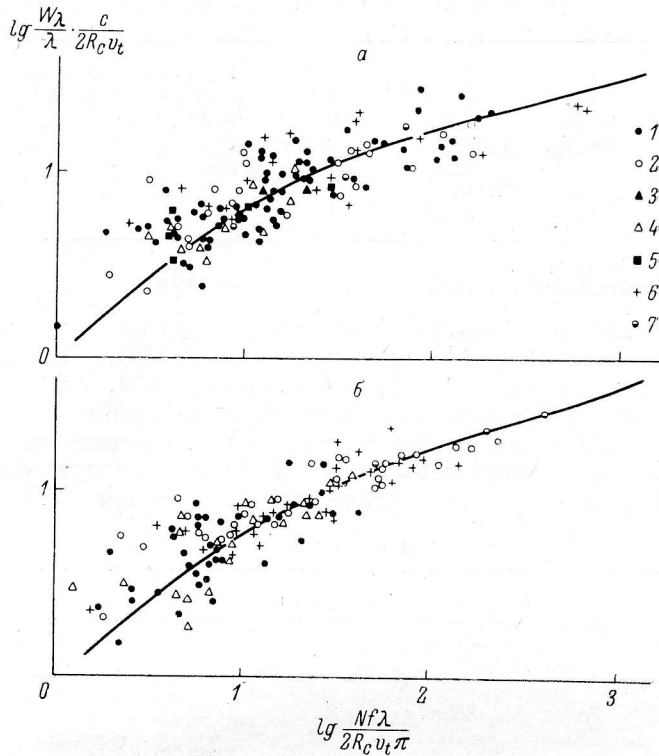
Рассматривая зависимости ($\lg n_e$, Sp) в работе [8], мы видим, что звезда 10 Aql располагается в области, близкой к III классу светимости,

ТАБЛИЦА 4

Параметр	10 Aql	† CrB
R_c	0.90	0.86
v_t	2.1	2.0
$\lg n_e$	13.35	13.54

как и звезды, изученные в [1], а звезда † CrB — в области между III и V классами светимости. Как говорилось выше, данные для определения $\lg n_e$ взяты из работы [2], и методика определения номера последней наблюдаемой водородной линии в этой работе нам неизвестна. По-видимому, эта величина занижена и, следовательно, значение $\lg n_e$ завышено, из-за чего † CrB переместилась ближе к звездам V класса светимости.

Для определения температур ионизации $T_{\text{и}}$ необходимо знать электронные плотности, определенные методом Унзольда ($\lg n'_e$) [9]. В табл. 5 приведены эквивалентные ширины W_λ водородных линий и определенные



Кривые роста для звезд 10 Aql (a) и CrB (б).
 1 — для FeI, 2 — для FeII, 3 — для CrI, 4 — для CrII,
 5 — для TiI, 6 — для TiII, 7 — для SiII.

по ним полные количества поглощающих атомов водорода на втором квантовом уровне в единичном столбе звездной атмосферы ($\lg N_{0,2H}$). В последнем столбце этой таблицы даны значения $\lg n'_e$, полученные методом Унзольда по эквивалентным ширинам линий H_γ и H_δ .

ТАБЛИЦА 5

Звезда	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{12}	H_{13}	H_{14}	$\lg N_{0,2H}$	$\lg n'_e$
10 Aql	11.4	15.3	9.1	9.1	7.5	6.1	4.7	3.4	3.0	2.1	16.35	14.33
CrB	10.3	10.3	10.9	9.5	8.3	7.4	5.6	4.2	2.8	—	16.21	14.00

§ 3. ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ

Температуры возбуждения $T_{\text{в}}$ и ионизации $T_{\text{и}}$ определялись по разным элементам, результаты даны в табл. 6 и 7. Наиболее уверенно $T_{\text{в}}$ определяется по Fe II, Ti II и Cr II. Температуры по Fe II всегда выше, как и по Si II. В первом случае это получается скорее всего из-за блендирования линий в мультиплетах с большими номерами, во втором — в результате неточности значений сил осцилляторов, о чем в литературе неоднократно упоминалось. В настоящее время нами исследуется ряд нормальных звезд

ТАБЛИЦА 6

Элемент	10 Aq1		† CrB	
	T_v (°K)	Вес	T_v (°K)	Вес
Fe I	7500	3	8850	3
Fe II	9000	1	10000	2
Ti II	6800	3	6100	2
Cr II	7700	2	6800	3
Mn II	7050	1	8050	1
Si II	11300	1	13600	3
Sr II	5550	1	—	—

Средняя
взвешенная . . . 7300 9150

с целью получения зависимостей T_v от спектрального класса Sp. Для нормальных звезд температуры, определенные по Fe II и Si II, получаются также выше, чем по остальным элементам. Веса в табл. 6 и 7 даны значениям соответствующих температур по трехбалльной шкале в зависимости от того, насколько уверенно они определяются. Средние значения температур получены с учетом весов. Эти температуры могут оказаться несколько завышенными по рассмотренным выше причинам.

ТАБЛИЦА 7

Элемент	10 Aq1		† CrB	
	T_n (°K)	Вес	T_n (°K)	Вес
Fe	8050	3	9500	3
Ti	6700	2	—	—
Cr	6100	2	5600	1
Mg	8200	1	7450	1
Si	—	—	10000	1

Средняя
взвешенная . . . 7400 9150

Для сравнения приведем данные других авторов. В работе [7] для 10 Aq1 получена температура возбуждения $T_v=6800^\circ$; у нас она равна 7300° , а без учета Si II и Fe II — 7100° . В работе [10] для † CrB T_v , определенная по линиям Cr II и Ti II,

ТАБЛИЦА 8

Элемент	T_v (°K)	
	Хак	Автор
Fe I	6550	8850
Fe II	9500	10000
Ti II	7600	6100
Cr II	7200	6800
Si II	10700	13600
Средняя	8300	9100

равна 6300° ; среднее взвешенное значение по нашим определениям $T_v=6500^\circ$. Таким образом, наши определения оказываются на $200-300^\circ$ выше. Несколько большее различие получается между данными автора и Хак [11]. В табл. 8 приведены T_v , определенные по ряду элементов для звезды † CrB. Наибольшая разница достигает 2300° по Fe I (нам кажется, что температуры, определенные в работе Хак, слишком занижены),

хотя среднее значение различается меньше — на 800° . Одним из возможных объяснений этого может быть следующее. Используемая нами дисперсия много меньше, чем у названных авторов, следовательно

влияние blends на слабые линии сильнее. Наиболее слабые линии входят в мультиплеты с большими номерами, в значительной мере влияющие на график $(\lg \frac{N_i}{g_i}, \epsilon_i)$, по которому определяется T_v . Разумеется, здесь могут сказываться и различия в системах сил осцилляторов, способ проведения непрерывного спектра, правильность отождествления линий и т. д.

В дальнейшем мы будем более подробно изучать соотношение спектральных классов и температур, а сейчас сделаем приближенные оценки. Пользуясь средними значениями T_v и T_H , можно оценить спектральные классы изучаемых звезд по зависимостям, приведенным в [12]. Получены такие значения Sp:

	Sp (T_v)	Sp (T_H)
10 Aq1	A2.5	A3.0
ι CrB	B9.5	B9.5

Таким образом, можно принять, что для 10 Aq1 Sp=A2.5 и для ι CrB Sp=B9.5. Если обратиться к табл. 2, то можно видеть, что приведенные там для 10 Aq1 спектральные классы более поздние. Для ι CrB согласие лучше, за исключением Sp(H), т. е. эта звезда менее «аномальна».

Полученные спектральные классы позволяют сделать вывод, что балмеровский скачок [4] у ι CrB соответствует не Sp(T_v), а Sp(H).

В заключение автор выражает благодарность И. М. Копылову за ценные замечания и Н. М. Чунаковой за помощь в обработке материала.

Литература

1. Ю. В. Глаголевский, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 2, 3, 1970.
2. S. Taffara, Mem. Soc. astr. ital., 39, No. 3, 437, 1968.
3. К. Осава, Ann. Tokyo astr. Obs., 9, No. 3, 123, 1965.
4. Ю. В. Глаголевский, Астр. ж., 43, 73, 1966.
5. Н. У. Бэбкок. Звездные атмосферы. Под ред. Гринстейна, ИЛ, М., 1963, стр. 283.
6. А. А. Боярчук, И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 31, 44, 1964.
7. L. H. Auer, Astrophys. J., 139, 1148, 1964.
8. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 26, 232, 1961.
9. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 35, 11, 1966.
10. L. Searle, W. T. Lingershausen, W. L. W. Sargent, Astrophys. J., 145, 141, 1966.
11. М. Наск, Oss. astr. Trieste Pubbl., No. 367, I, 1967.
12. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 30, 69, 1963.

Декабрь 1969 г.