

УДК 524.31.01+524.314.7

## Спектроскопическое исследование сверхгиганта 89 Геркулеса

С. К. Зейналов, А. М. Халилов, А. Р. Гасанова

По спектрограммам с дисперсией 0.8 и 1.7 нм/мм методом кривых роста найдены параметры атмосферы 89 Her (F2 Ia) и определены содержания 24 элементов. Содержания кальция, скандия и элементов тяжелее циркония в атмосфере 89 Her ниже, чем в атмосфере Солнца. Отмечен избыток содержания натрия, что согласуется с результатами, полученными для других F-звезд высокой светимости [2]. Обнаружен значительный дефицит бария.

*SPECTROSCOPIC INVESTIGATION OF THE SUPERGIANT 89 HERCULIS, by Zejnolov S. K., Khalilov A. M., Gasanova A. R.— Using spectrograms with the dispersion 0.8 and 1.7 nm/mm the parameters of the atmosphere of 89 Her (F2 Ia) and abundances of 24 elements are determined by curve-of-growth method. Ca, Sc and elements heavier than Zr are underabundant in the atmosphere of 89 Her relative to the Sun. Na is overabundant, that is in agreement with the results obtained for other high luminosity stars [2]. Ba is strongly underabundant.*

Звезда 89 Her ( $V=5.44$ , спектральный класс F2 Ia) — стандарт спектральной классификации [8], расположена на галактической широте  $b=21.9^\circ$  и расстоянии от галактической плоскости  $z=2600$  пк. Абсолютная звездная величина разными авторами оценивается от  $-6$  до  $-9^m$  [9]. Звезда обнаруживает изменения блеска пульсационного характера с периодом  $63.5^d$  [9] и  $68^d$  [10]. В видимой области спектра 89 Her наблюдаются околозвездные компоненты [6], которые для линий бальмеровской серии прослеживаются до  $H_\delta$ .

Таблица 1. Основные данные о спектрограммах

Дата наблюдений, 1980 г.	Эмульсия	Время экспозиции, мин	Дисперсия, нм/мм	Спектральная область, нм
22.05	Kodak 103a-O	90	0.8	360—490
28.05	Kodak 103a-O	90	0.8	360—490
15.04	Kodak 103a-F	140	1.7	490—690

Изучая атмосферы четырех сверхгигантов спектрального класса F (в том числе 89 Her), Абт [8] пришел к выводу, что высокоширотные сверхгиганты имеют существенный дефицит (по отношению к Fe) некоторых элементов, в первую очередь элементов, образующихся в результате s-процесса.

По спектрограммам с дисперсией 2.34 нм/мм Т. С. Галкина и И. М. Копылов [5] методом кривых роста не обнаружили аномалий химического состава атмосферы 89 Her относительно других F-сверхгигантов.

Ввиду неполноты и противоречивости имеющихся данных мы выполнили анализ 89 Her по спектрограммам с высокой дисперсией с использованием новых значений сил осцилляторов. Эта работа будет основой для дальнейшего исследования звезды методом моделей атмосфер.

**Наблюдательный материал и его обработка.** Спектрограммы получены в фокусе куде 2-м телескопа обсерватории в Ондражейове (ЧССР). Основные данные о спектрограммах приведены в табл. 1. Регистрограммы спектров записывались на микрофотометре «Лирефо» в почернениях с увеличением в 40 раз. Эквивалентные ширины, как правило, определялись путем измерения площадей профилей линий. Для линий, профиль которых искажен блендированием соседней линией, эквивалентные ширины определялись следующим образом. Используя эквивалентные ширины  $W_\lambda$  неблендированных линий, мы построили зависимость  $W_\lambda$  от центральной глубины  $R$ . По полученным

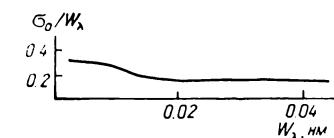
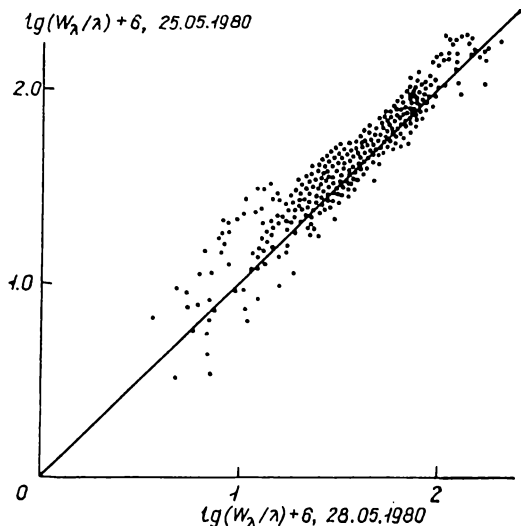


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки измерения эквивалентной ширины  $\sigma_0/W_\lambda$  от эквивалентной ширины  $W_\lambda$

Рис. 1. Сравнение эквивалентных ширин линий для двух дат в спектре 89 Her

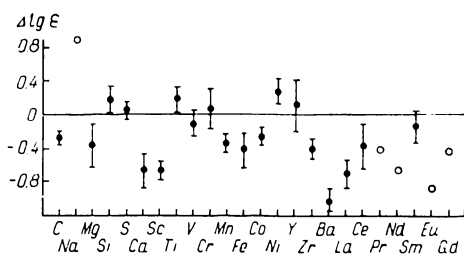
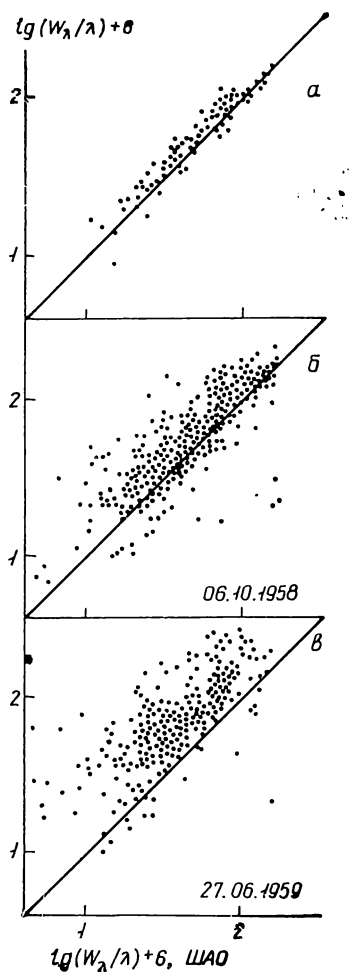


Рис. 4. Сравнение химического состава атмосфер 89 Her и Солнца. Светлые кружки относятся к элементам, содержание которых определено по одной линии

Рис. 3. Сравнение измеренных эквивалентных ширин линий 89 Her с данными [8] (а) и [5] (б, в)

зависимостям определялись эквивалентные ширины линий, профили которых искажены блендированием, а центры линий свободны от блендирования. На рис. 1 видно, что между эквивалентными ширинами, измеренными на двух спектрограммах в синей области, нет систематических различий; отмечается значительный разброс для значений  $\lg[(W_\lambda/\lambda) \cdot 10^6] < 1.2$ . Поэтому для определения содержания элементов мы

Таблица 2. Исследованные линии

Элемент $\lambda$ , нм	Номер мультиплета	$\lg gf\lambda$	$\lg [(W_\lambda/\lambda) \cdot 10^6]$	Элемент $\lambda$ , нм	Номер мультиплета	$\lg gf\lambda$	$\lg [(W_\lambda/\lambda) \cdot 10^6]$
C I				Ti II			
476.662	6	1.28	1.10	402.833	87	2.48	1.82
477.000	6	1.40	1.19	406.435	106	1.81	1.34
477.172	6	1.98	1.58	416.364	105	3.22	1.84
477.587	6	1.48	1.16	417.190	105	3.06	1.84
658.775	22	2.48	1.25	418.433	21	0.95	1.53
Na I				428.790	20	1.67	1.75
568.820	6	3.33	1.56	429.023	41	2.47	2.00
588.997	1	3.89	1.89	430.193	41	2.14	1.83
589.593	1	3.59	0.61	430.790	41	2.30	1.88
470.298				431.286	41	2.26	1.81
473.004	15	2.43	1.49	431.498	41	2.16	1.82
552.841	11	3.09	1.52	431.681	94	1.81	1.37
416.727	10	1.61	0.88	433.026	94	2.10	1.54
571.109	9	3.26	1.62	433.071	41	1.29	1.65
Si I	8	2.05	0.20	439.406	51	1.71	1.66
570.844				439.585	61	1.43	1.51
570.114	10	1.70	0.89	439.831	61	1.64	1.44
Mg I	10	2.39	1.18	439.977	51	2.13	1.84
579.313	9	1.70	0.64	440.922	61	1.43	1.41
579.791	9	1.71	0.76	441.108	115	2.32	1.43
Si II				441.772	40	2.27	1.88
385.366	1	1.98	1.67	442.195	93	1.98	1.44
385.602	1	2.92	2.27	444.173	40	1.30	1.58
386.259	1	2.69	1.87	445.049	19	2.06	1.75
413.088	3	4.37	1.54	446.446	40	1.63	1.66
505.602	5	4.24	1.56	447.086	40	1.43	1.56
597.897	4	3.71	0.88	452.945	82	1.51	1.51
634.709	2	4.02	1.71	470.866	49	1.04	1.37
637.136	2	3.73	1.60	512.914	86	2.20	1.62
S I				518.590	86	2.15	1.65
469.625	2	1.91	0.90	518.870	70	2.56	1.91
604.604	10	3.00	0.82	526.862	103	2.12	1.46
605.266	10	3.15	0.90	533.681	69	1.98	1.57
Ca I				541.889	69	1.54	1.33
422.673	2	3.87	1.94	649.161	91	1.61	1.12
428.301	5	3.41	1.36	V II			
442.545	4	3.27	1.28	386.674	11	1.59	1.70
443.496	4	3.62	1.54	387.872	33	2.80	2.18
443.569	4	3.15	1.40	390.327	11	2.39	1.75
445.589	4	3.14	1.20	391.433	33	2.57	2.17
558.197	21	3.21	1.19	391.642	10	2.01	1.92
558.876	21	3.89	1.48	395.197	10	2.34	1.85
559.012	21	3.09	1.26	397.364	9	2.11	1.64
612.222	3	3.36	1.28	397.773	10	1.62	1.60
616.217	3	3.54	1.33	399.712	9	1.98	1.94
643.907	18	3.80	1.31	400.294	9	1.79	1.71
649.378	18	3.38	0.60	400.571	32	2.84	2.06
Sc II				402.339	32	2.72	1.71
424.682	7	3.95	1.88	403.677	9	1.63	1.43
429.477	15	2.23	1.32	418.344	37	2.26	1.41
431.408	15	3.48	2.02	543.930	53	0.94	0.26
432.074	15	3.37	1.85	Cr I			
440.035	14	3.01	1.66	425.435	1	3.52	1.70
503.102	23	3.36	1.91	427.480	1	3.40	1.62
552.681	31	3.86	1.52	428.972	1	3.25	1.93
564.097	29	2.71	0.90	434.451	22	3.09	1.66
566.903	29	2.63	0.90	460.076	21	2.60	0.82
624.563	28	2.82	1.44	529.669	18	2.39	0.92
Ti I				534.832	18	2.44	1.33
395.821	13	3.44	1.71	540.979	18	3.01	1.09
398.976	12	3.41	1.47	Cr II			
399.864	12	3.55	1.64	397.951	183	2.91	1.31
400.893	12	2.53	0.95	405.197	19	1.30	1.65
428.740	44	3.19	1.03	408.230	165	2.48	1.13
Ti II				408.614	26	1.39	1.37
401.237	11	1.97	1.91	411.324	18	1.03	1.43
402.514	11	1.63	1.80	414.577	162	2.52	1.33

Элемент $\lambda$ , нм	Номер мультиплета	$\lg g/\lambda$	$\lg [(W_\lambda/\lambda) \cdot 10^6]$	Элемент $\lambda$ , нм	Номер мультиплета	$\lg g/\lambda$	$\lg [(W_\lambda/\lambda) \cdot 10^6]$
Cr II				Fe I			
424.238	31	2.61	1.76	418.176	354	3.31	1.64
425.262	31	1.78	1.54	418.780	152	3.07	1.68
426.192	31	2.42	1.68	419.144	152	2.92	1.63
426.928	31	1.57	1.59	419.534	693	3.02	1.44
428.421	31	1.99	1.56	419.831	152	2.90	1.76
455.502	44	2.21	1.65	420.203	42	2.91	1.98
456.578	39	1.75	1.40	420.399	355	2.69	1.49
461.664	44	2.15	1.48	420.713	352	2.12	1.36
461.883	44	2.70	1.71	421.035	152	2.67	1.50
483.622	30	1.79	1.48	422.222	152	2.66	1.55
530.844	43	1.98	1.45	422.418	689	3.08	1.51
531.070	43	1.56	1.28	422.743	693	3.81	1.70
531.359	43	2.34	1.57	423.594	152	3.29	1.78
533.488	43	2.14	1.60	423.882	693	3.26	1.51
Mn I				424.743	693	3.28	1.59
403.449	2	2.50	1.67	425.079	42	2.90	1.84
404.136	5	3.78	1.40	426.048	152	3.66	1.84
405.554	5	3.42	1.17	427.116	152	3.28	1.89
408.294	5	3.19	1.22	428.241	71	2.81	1.58
478.342	16	3.71	1.10	435.274	71	2.35	1.47
602.180	27	3.57	0.32	437.593	2	0.61	1.58
Fe I				438.355	41	3.84	1.99
380.873	222	2.42	1.58	440.842	68	1.90	1.24
382.783	45	3.64	1.97	441.513	41	3.02	1.86
384.680	664	3.49	1.84	442.731	2	0.61	1.57
385.258	73	2.31	1.68	443.061	68	1.99	1.25
386.722	488	3.05	1.67	444.234	68	2.40	1.58
386.956	284	2.26	1.42	444.772	68	2.31	1.33
387.175	429	2.69	1.66	445.912	68	2.37	1.56
387.376	175	2.70	1.85	446.938	830	3.13	1.47
387.802	20	2.68	2.21	449.457	68	2.51	1.51
387.858	4	2.21	2.14	452.514	826	3.17	1.31
389.339	430	3.02	1.52	452.862	68	2.84	1.70
389.971	4	2.06	2.18	453.116	39	1.51	1.27
390.295	45	3.12	2.15	473.678	554	2.84	1.37
390.794	280	2.43	1.41	528.180	383	2.68	1.45
392.026	4	1.84	2.10	530.231	553	2.83	1.39
392.291	4	1.94	2.12	532.418	553	3.41	1.60
394.753	361	2.45	1.57	532.853	37	1.90	1.40
394.878	604	3.20	1.71	533.994	553	2.94	1.50
394.995	72	2.38	1.84	534.103	37	1.68	1.40
395.117	661	3.08	1.41	536.747	1146	3.96	1.45
395.668	278	3.22	1.99	536.996	1146	3.98	1.45
398.396	277	2.63	1.58	540.414	1165	4.14	1.60
399.805	276	2.69	1.47	541.091	1165	3.85	1.53
400.525	43	2.99	2.14	541.520	1165	4.09	1.56
400.728	277	2.25	1.16	544.504	1163	3.54	1.33
400.971	72	2.37	1.57	556.360	1062	2.67	0.66
401.716	527	2.62	1.34	556.962	686	3.08	1.32
404.390	276	2.22	1.42	557.285	686	3.29	1.43
404.461	359	2.49	1.31	557.610	686	2.74	1.19
404.581	43	3.89	2.11	561.565	686	3.51	1.51
405.823	558	2.47	1.14	590.567	1181	2.98	0.64
406.360	43	3.67	2.08	602.407	1178	3.61	1.22
406.798	559	3.06	1.38	Fe II			
407.174	43	3.60	1.96	382.192	14	-0.23	1.81
407.479	524	2.57	1.21	411.953	21	-0.59	1.45
408.531	559	2.74	1.38	412.264	28	-0.00	1.84
410.749	354	2.77	1.38	413.840	39	-0.55	1.37
410.981	357	2.65	1.49	417.886	28	0.81	2.19
411.445	357	2.32	1.20	423.317	27	1.53	2.18
411.855	801	3.79	1.64	427.332	27	0.10	1.74
413.206	43	2.99	1.96	427.813	32	-0.23	1.59
413.468	357	3.02	1.58	429.657	28	0.37	1.84
414.767	42	1.52	1.54	430.317	27	0.81	2.00
415.779	695	3.02	1.32	435.176	27	1.16	2.04
417.564	354	2.87	1.44	436.940	28	-0.18	1.70

Элемент $\lambda$ , нм	Номер мультиплета	$\lg gf\lambda$	$\lg [(W_\lambda/\lambda) \cdot 10^6]$	Элемент $\lambda$ , нм	Номер мультиплета	$\lg gf\lambda$	$\lg [(W_\lambda/\lambda) \cdot 10^6]$
Fe II				Y II			
438.538	27	0.86	1.86	395.035	6	3.11	1.85
441.360	32	-0.42	1.48	417.754	14	3.15	1.96
441.682	27	0.84	1.89	437.494	13	3.80	1.88
447.292	37	-0.03	1.57	511.912	20	2.40	1.55
448.919	37	0.50	1.84	520.042	20	3.10	1.58
449.140	37	0.64	1.85	540.278	35	2.32	1.09
451.534	37	0.86	1.87	554.461	27	2.97	1.38
452.022	37	0.76	1.86	554.602	27	2.93	1.19
452.263	38	1.20	1.90	572.891	34	3.01	1.02
454.152	38	0.45	1.72	Zr II			
455.589	37	1.01	1.93	399.114	30	2.95	1.56
457.633	38	0.41	1.76	405.032	43	2.31	1.10
458.283	37	0.22	1.83	414.922	41	3.15	1.58
458.383	38	1.51	2.08	420.899	41	2.75	1.38
462.051	38	0.05	1.64	421.188	15	2.10	1.38
462.934	37	1.02	1.85	437.978	88	3.04	1.26
466.580	26	-1.13	0.83	444.045	79	2.25	1.02
466.675	37	0.10	1.66	449.696	40	2.21	1.25
473.144	43	0.27	1.73	Ba II			
519.757	49	1.10	1.82	455.403	1	3.83	1.86
527.599	49	1.33	1.87	493.409	1	3.53	2.06
531.661	49	1.57	1.99	585.368	2	2.77	1.23
532.556	49	0.39	1.64	614.172	2	3.72	1.54
536.286	48	1.13	1.76	649.690	2	3.43	1.41
541.409	48	0.11	1.56	La II			
553.486	55	0.76	1.68	398.851	40	3.74	0.93
614.774	74	0.99	1.44	408.672	10	3.55	1.13
614.924	74	0.94	1.54	433.376	24	3.56	1.17
623.838	74	1.00	1.53	Ce II			
624.756	74	1.36	1.66	460.640	6	3.53	0.71
641.690	74	0.79	1.32	462.816	1	3.84	0.79
643.265	40	0.08	1.45	Pr II			
Co I				418.952	8	4.10	0.82
399.531	31	3.58	1.39	Nd II			
412.132	158	3.43	1.07	406.108	10	4.05	0.73
Ni I				Sm II			
446.246	86	3.08	1.19	459.529	45	3.03	0.51
471.442	98	3.71	1.11	467.460	14	3.26	0.60
471.578	98	3.14	0.80	470.440	1	2.79	0.49
475.652	98	3.27	1.07	Eu II			
490.441	129	3.37	1.15	412.973	1	3.93	1.15
Ni II				Gd II			
401.550	12	1.14	1.38	425.173	15	3.70	0.75
424.480	9	0.47	1.11				
436.210	9	0.93	1.20				

использовали усредненные значения эквивалентных ширин. Результаты измерения эквивалентных ширин линий в области спектра  $\lambda\lambda$  360—690 нм приведены в табл. 2.

Оценка точности определения эквивалентных ширин, полученных по спектрограммам с дисперсией 0.8 нм/мм, представлена на рис. 2. Ошибка для больших эквивалентных ширин составляет 15 %, для малых — 33 %.

Полученные нами значения эквивалентных ширин на рис. 3 сравниваются с измерениями [8] (дисперсия 0.85 нм/мм) и [5] (2.34 нм/мм). Сравнение с результатами [8] показывает систематическое различие (рис. 3, а). Данные [8] несколько больше наших — примерно на 0.07 dex. Сравнение с результатами [5], полученными в разное время, оказалось неоднозначным. Если эквивалентные ширины по наблюдениям 06.10.1958 г. лишь слегка превышают наши результаты (примерно на 0.06 dex), то наблюдения 27.06.1959 г. дают заметно ббльшие значения — примерно на 0.25 dex. Это можно объяснить различиями в методике обработки либо связать с физической переменностью исследуемой звезды.

Определение химического состава. Химический состав и физические условия в атмосфере 89 Нег определены методом кривых роста. В качестве теоретической мы ис-

пользовали кривую роста, рассчитанную Врубелем [11] для параметра  $B_0/B_1=1/3$ . На основании спектрального класса задавались предварительные значения температурного параметра возбуждения  $\theta_b=5040/T_b=0.75$  и электронной плотности  $\lg P_e=0.75$ . Применяя методику [1], мы определили содержания элементов  $\lg \epsilon$  (табл. 3) и следующие параметры атмосферы 89 Her:  $\theta_b=0.79\pm 0.02$ ;  $\lg P_e=0.20\pm 0.10$ ; турбулентная скорость  $v_{\text{турб}}=6.5\pm 1.5$  км/с. Для сравнения в табл. 3 представлен химический состав атмосферы Солнца. Величины  $gf$  в основном взяты из [1]. Однако для Fe I и Fe II приняты уточненные данные [3, 4], а для Ti I мы использовали источники из [7].

Таблица 3. Химический состав атмосфер 89 Her и Солнца

Элемент	Число линий	$\lg \epsilon$		Элемент	Число линий	$\lg \epsilon$	
		89 Her	Солнце			89 Her	Солнце
C I	5	8.33±0.05	8.61	Fe II	44	7.22±0.20	7.60
Na I	1	7.18	6.28	Co I	2	4.44±0.10	4.70
Mg I	5	6.99±0.25	7.36	Ni I	5	6.58±0.15	6.06
Si I	4	7.94±0.15	7.65	Ni II	3	6.12±0.10	6.21
Si II	8	7.53±0.18	7.55	Y II	9	2.28±0.30	2.18
S I	3	7.29±0.10	7.24	Zr II	8	2.55±0.10	2.96
Ca I	13	5.67±0.20	6.36	Ba II	5	1.07±0.15	2.11
Sc II	10	2.33±0.10	3.00	La II	3	0.58±0.15	1.30
Ti I	5	5.19±0.03	4.86	Ce II	2	1.22±0.25	1.59
Ti II	37	4.69±0.17	4.82	Pr II	1	0.42	0.83
V II	15	4.09±0.15	4.21	Nd II	1	0.58	1.26
Cr I	8	5.78±0.26	5.61	Sm II	3	0.90±0.17	1.06
Cr II	20	5.35±0.05	5.50	Eu II	1	-0.18	0.70
Mn I	6	5.01±0.10	5.35	Gd II	1	0.67	1.12
Fe I	99	7.11±0.15	7.60				

На рис. 4 приводятся разности  $\Delta \lg \epsilon = \lg \epsilon_* - \lg \epsilon_{\odot}$ . Видно, что содержания углерода, магния, кальция и скандия понижены в атмосфере 89 Her, содержания кремния и серы близки к солнечным. Мы получили значительный (в восемь раз) избыток натрия (в согласии с результатами для других F-звезд высокой светимости [2]). Его содержание определялось по одной линии, линии  $D_1$  и  $D_2$  не использовались. У элементов группы железа содержания близки к солнечным, однако у марганца, железа, кобальта они, возможно, понижены. Отметим дефицит элементов тяжелее циркония (примерно на 0.5 dex), в том числе значительный дефицит бария (более, чем в десять раз).

Наши результаты подтверждают основные выводы [8], полученные также методом кривых роста.

Мы благодарны И. С. Саванову за обсуждение работы и Н. А. Саломатиной за помощь в обработке материала.

1. Боярчук А. А., Боярчук М. Е. Спектроскопическое исследование трех сверхгигантов класса F8 // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1981.—63.— С. 66—85.
2. Боярчук А. А., Любимков Л. С. Детальный анализ сверхгигантов класса F // Там же.— 1983.—66.— С. 130—139.
3. Боярчук А. А., Саванов И. С. Силы осцилляторов для нейтрального железа и его содержание в атмосфере Солнца // Там же.— 1985.—70.— С. 57—128.
4. Боярчук А. А., Саванов И. С. Силы осцилляторов для линий ионизованного железа // Там же.— 1986.—74.— С. 49—68.
5. Галкина Т. С., Копылов И. М. Количественный анализ атмосфер горячих сверхгигантов // Там же.— 1962.—28.— С. 35—93.
6. Зейналов С. К., Ченцов К. П. Околозвездные абсорбции в спектре сверхгиганта 89 Her // Астрон. циркуляр.— 1976.— № 923.— С. 2—5.
7. Любимков Л. С., Рачковская Т. М. Атмосферы пульсирующих переменных типа  $\delta$  Sct // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1985.—71.— С. 127—144.
8. Abt H. A. // Astrophys. J.— 1960.—131, N 1.— P. 99—110.
9. Arellano Ferro A. // Publ. Astron. Soc. Pacif.— 1984.—96, N 582.— P. 641—645.
10. Fernie J. D. // Astrophys. J.— 1981.—243, N 2.— P. 576—582.
11. Wrubel M. N. // Ibid.— 1949.—109, N 7.— P. 66—75.