

АТМОСФЕРА СВЕРХГИГАНТА 6 Cas

II. СКОРОСТИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДВИЖЕНИЙ, ЭЛЕКТРОННАЯ ПЛОТНОСТЬ И УСКОРЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Г. И. Аббасов, С. К. Зейналов, Е. Л. Ченцов

По кривым роста и кривым корреляции эквивалентных ширин и полуширин линий найдены микротурбулентные скорости v_m в атмосфере 6 Cas на 17—18 августа 1969 г., которые составляют 14.8 км/сек. для Fe II, Si II и Mg II, 11.3 и 9.5 км/сек. соответственно для Ti II и Fe I. Полученные методом корреляции ширин линий макротурбулентные скорости имеют для всех указанных элементов близкие значения — в среднем около 27 км/сек. Выявлены временные изменения микротурбулентной скорости (для девяти дат в октябре 1964 г. и сентябре 1965 г.) по линиям Fe II — v_m изменяются от 14.4 до 19.0 км/сек.

Найдены по формуле Инглиса—Теллера и методом Унзольда величины логарифма электронной плотности, составляющие соответственно 11.7 и 12.3.

Из сопоставления наблюдаемых профиля и эквивалентной ширины линии H_γ с теоретическими определено значение логарифма ускорения силы тяжести (0.96), уступающее значению, полученному по массе и радиусу 6 Cas (1.24).

Показано, что ряд параметров 6 Cas, характеризующих спектроскопические проявления нестационарности атмосферы, превосходит по величине таковые у сверхгигантов спектрального класса A более низкой светимости.

From the curves of growth and from those of correlation of equivalent widths and half-widths of lines the microturbulent velocities v_m are found in the atmosphere of 6 Cas for 17—18 August 1969, which are 15.0 km/s for Fe II, Si II, and Mg II (the deepest atmospheric layers accessible for spectroscopy), 11.3 and 9.6 km/s for Ti II and Fe I respectively (the layers closer to the surface). The macroturbulent velocities obtained by the method of correlation of line widths have approximating values for all the elements mentioned — about 27 km/s on the average. The temporal variations in microturbulent velocity are revealed (for 9 dates in October 1964 and September 1965) from the Fe II—lines — v_m vary from 14.4 to 19.0 km/s.

By the formula of Inglis—Teller and the method of Unsold the values of the electron density logarithm are found that are 11.7 and 12.3 respectively.

From a comparison of the observed profile and equivalent width of H_γ-line with the theoretical ones the value of the logarithm of gravitational acceleration is determined (0.96) which yields to that obtained from the mass and radius of 6 Cas (1.24).

It is shown that some parameters of 6 Cas which characterize spectroscopic manifestation of atmospheric instability exceed those of the A-supergiants of lower luminosity.

Настоящая работа основывается главным образом на фотометрических параметрах линий, полученных нами ранее [1] по спектрограммам сверхгиганта 6 Cas с дисперсией 4 и 14 Å/мм с помощью преобразователя «диаграмма—код» и электронной вычислительной машины. Кроме того, использованы результаты повторной обработки двух из четырех спектрограмм высокой дисперсии, проведенной по новой программе, реализующей следующие усовершенствования методики обработки: а) введение поправок за нелинейность преобразователя, значительно уменьшающих систематические ошибки [2], и б) интерполирование, позволяющее находить

полуширины линий с точностью до десятой доли шага квантования по оси длин волн [3].

Скорости микро- и макротурбулентных движений (v_m и v_M) в атмосфере 6 Cas находились с помощью кривых роста и кривых корреляции полуширин и эквивалентных ширин линий. В качестве теоретических использованы кривая роста Унзольда [4] и семейство кривых корреляции ширин линий ван ден Хевеля [5], построенные исходя из одних и тех же предположений (полумпирическая формула Миннаэрта), что позволяет уменьшить чисто методическое расхождение результатов.

При построении кривых роста взята в качестве основной система сил осцилляторов, принятая в [6]. Для линий ионизованного железа использован также список сил осцилляторов из работы [7]. В обоих случаях кривые роста дают близкие значения v_m , различающиеся не более чем на 10–15%.

Для построения кривых корреляции наблюдаемые значения полуширин линий из табл. 2 в [1] были исправлены за инструментальное уширение. Инструментальная полуширина (0.18 Å), найденная по линиям спектра сравнения, в 3.5–5 раз меньше наблюдаемых полуширин.

Реализуя задачу, поставленную в [1], мы попытались прежде всего определить значения v_m и v_M на различных глубинах в атмосфере 6 Cas, характеризующие ее состояние в момент получения спектрограмм высокой дисперсии (17 и 18 августа 1969 г.; заметных изменений скоростей турбулентности между этими датами не произошло). Для этого v_m и v_M были найдены отдельно по линиям Fe II, Fe I, Ti II, Cr II и совместно по линиям Si II и Mg II. В каждой из пяти указанных групп линий использованы лишь линии, незначительно искаженные блендированием или совершенно свободные от бленд. Недостаток таких линий не позволил нам проследить за изменением турбулентных скоростей в зависимости от потенциала возбуждения внутри отдельных групп.

Образцы кривой роста и кривых корреляции ширин линий приведены на рис. 1 и 2.

ТАБЛИЦА 1

Турбулентная скорость и метод ее определения	Элементы и потенциалы возбуждения, эв					
	Si II, Mg II (6.8–10.0)	Fe II (2.6–2.8)	Cr II (3.1–4.1)	Ti II (1.1–1.6)	Fe I (0.1–1.8)	
v_m (км/сек.)	по кривым роста . . .	14.5±2.0	15.4±1.2	14.4±1.7	11.0±1.2	9.6±1.7
	по кривым корреляции ширин	15.6±2.5	14.3±1.5	11 :	11.8±2.0	9.3±2.0
	средние значения . . .	15.0±2.2	14.8±1.3	13.5±1.7	11.4±1.6	9.4±1.8
v_M (км/сек.)	по кривым корреляции ширин	26.8±2.0	26.5±2.0	27.5 :	27.0±2.0	28.0±2.0

В табл. 1 (в первой и второй строках) сопоставлены микротурбулентные скорости, определенные обоими методами, а также ошибки их определения (здесь и ниже даются случайные ошибки, оцененные по разбросу точек на соответствующих графиках). Несмотря на то что метод корреляции ширин линий не связан с использованием сил осцилляторов и позволяет поэтому привлекать для определения v_m большее количество линий, он дает по сравнению с методом кривых роста несколько менее точные результаты. Связано это, по-видимому, отчасти с самим существом метода (наклон «рабочей» части кривой слабо зависит от величины параметра v_M/v_m), отчасти же с тем, что полуширины линий более чувствительны к блендированию, чем эквивалентные ширины. Последнее обстоятельство порождает,

в частности, характерный изгиб эмпирической кривой корреляции в сторону больших полуширин, придающий ей форму вытянутой по вертикали буквы *S*. Обычно этот изгиб приходится на интервал значений $\lg(W_\lambda/\lambda \times 10^6)$ от 1.2 до 1.6, в котором частота блендирования, по нашим данным, почти вдвое выше, чем в соседних интервалах.

Максимальное значение микротурбулентной скорости дают линии Si II, Mg II и Fe II, меньшее — линии Ti II, минимальное — линии Fe I. Такая же закономерность выявлена Розендалем и Вегнером [8] и Айдином [9] для 6 Cas и других сверхгигантов спектрального класса А.

Величина макротурбулентной скорости v_M (см. четвертую строку табл. 1) в пределах ошибок остается неизменной на разных глубинах в атмосфере. Среднее значение v_M равно 27 км/сек. Оно характеризует геометрическое уширение линий в спектре 6 Cas, которое, помимо макротурбуленции в атмосфере звезды, может быть вызвано также и другими причинами, в частности осевым вращением звезды. Оценить отно-

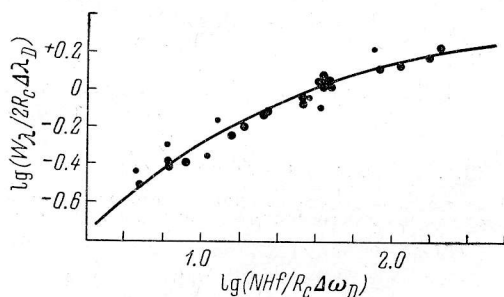


Рис. 1. Кривая роста по линиям Fe II мультиплетов 27, 28, 37, 38 (использованы силы осцилляторов по [7]), совмещенная с теоретической кривой из [4].

Большими точками показаны линии, свободные от бленд.

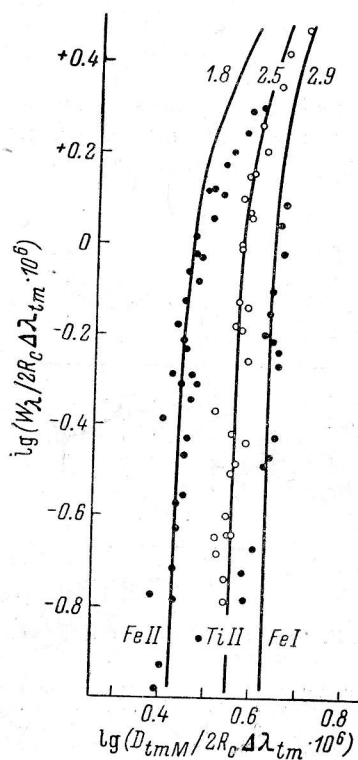


Рис. 2. Кривые корреляции ширины линий для Fe II, Ti II и Fe I, совмещенные с соответствующими ветвями семейства теоретических кривых из [5].

Цифры у верхних концов теоретических кривых — параметры v_M/v_m .

сительную роль указанных факторов для случая конкретной звезды довольно трудно, однако статистическое и звездноеволюционное рассмотрение этого вопроса (сделанное, например, в работе [12]) показывает, что для сверхгигантов класса А макротурбулентные скорости превосходят скорости вращения.

Для изучения изменений микротурбуленции со временем использованы эквивалентные ширины линий, измеренные по спектрограммам с дисперсией 14 Å/мм. Как видно из рис. 3 и 4, изменения от даты к дате v_m , найденных по кривым роста для линий Fe II, прослеживаются вполне уверенно, причем иногда значительные изменения v_m происходят всего за одни сутки. Максимальный перепад микротурбулентной скорости, зафиксированный в нашей работе (около 5 км/сек. по девяти датам наблюдений в октябре 1964 г. и сентябре 1965 г.), несколько меньше зафиксированного Розенда-

лем и Вегнером (9 км/сек., 12 дат, сентябрь—октябрь 1956 г. [8]) и Галкиной и Копыловым (6 км/сек., две даты, осень 1958 г. [13]).

Электронная плотность n_e в атмосфере 6 Cas оценена нами по номеру m последней наблюдаемой линии серии Бальмера (формула Инглиса—Теллера) и по эквивалентным ширинам линий H_γ и H_δ (метод Унзольда, усовершенствованный Копыловым [14]).

Экстраполяцией зависимости центральной глубины R_0 линии бальмеровской серии от ее номера найдено

$$m = 32 \pm 0.5.$$

При этом максимальное значение R_0 , использованное в предыдущем разделе при определении турбулентных скоростей, составляет 0.63. Формула Инглиса—Теллера дает

$$\lg n_e(m) = 11.7,$$

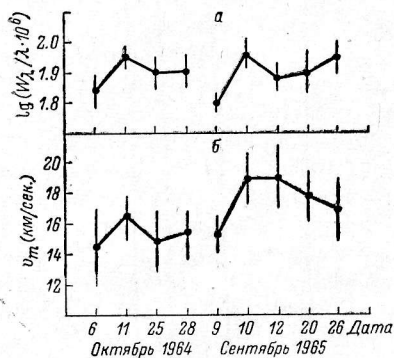


Рис. 3. Переменность линий Fe II в спектре 6 Cas.

a — средние значения эквивалентных ширин линий $\lambda\lambda$ 4173, 4178, 4303, 4385, 4508, 4515, 4520 и 4555 Å; *b* — микро-турбулентные скорости. Вертикальные штрихи — ошибки наблюдений.

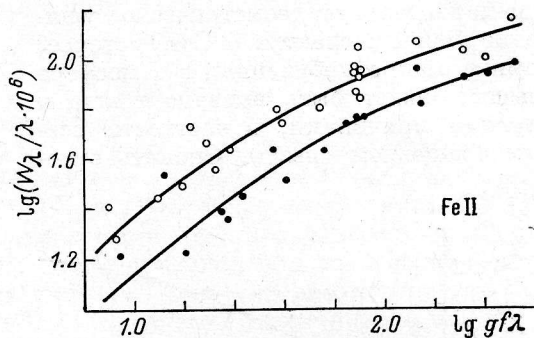


Рис. 4. Кривые роста по линиям Fe II.

Черные точки — по наблюдениям 9 сентября, светлые точки — по наблюдениям 10 сентября 1965 г.

метод Унзольда

$$\lg n_e(H_\gamma, H_\delta) = 12.3.$$

Атмосфера 6 Cas заметно разреженнее атмосфер обычных сверхгигантов класса A: обе приведенные величины меньше средних значений $\lg n_e$, получаемых теми же методами для указанных звезд, и близки к величинам, полученным Прижибильским для сверх-сверхгиганта Большого Магелланова Облака HD 33579 [15].

Ускорение силы тяжести на поверхности 6 Cas определено двумя методами: 1) по массе и радиусу звезды ($g_{\text{дин}}$) и 2) сопоставлением наблюдаемых и теоретических профилей и эквивалентных ширин водородных линий ($g_{\text{эфф}}$).

1. Прежде всего мы попытались уточнить значения визуальной и болометрической абсолютных величин (M_v и $M_{\text{бол}}$) и эффективной температуры ($T_{\text{эфф}}$ и $\theta_{\text{эфф}}$) 6 Cas, необходимые для определения ее массы и радиуса.

Зависимость между M_v и эквивалентными ширинами линий H_γ и H_δ для сверхгигантов класса A, построенная по данным работ [6, 12, 15—22], дает для 6 Cas

$$M_v = -8^m60 \pm 0^m20.$$

Аналогичным образом, по отношению эквивалентных ширин линий Fe II и Mg II, был найден спектральный класс, значение которого, A 2.5, совпало с принятым для 6 Cas в [18].

Для уточнения M_v мы использовали также то обстоятельство, что 6 Cas является членом ассоциации Cas OB 5. Видимые величины и цвета, спектральные классы и лучевые скорости 6 Cas и 17 других членов ассоциации, послуживших звездами сравнения, взяты нами из работ [23—27], а их абсолютные величины и собственные цвета — из [28, 29]. Приняв для 6 Cas модуль расстояния $(m_0 - M) = 12^m 18$, соответствующий максимуму функции распределения звезд сравнения по $(m_0 - M)$, мы получили

$$M_v'' = -8^m 50 \pm 0^m 20.$$

Имея в виду, что визуальный блеск 6 Cas меняется по Баппу [30] на $0^m 1$, мы приняли окончательно

$$M_v = -8^m 55 \pm 0^m 20$$

и после введения болометрической поправки по Джонсону [31] получили

$$M_{bol} = -8^m 67.$$

Значения $\theta_{эфф}$, соответствующие спектральному классу A 2.5 по шкалам эффективных температур Копылова [32], Михаласа [33], Джонсона [31] и Шильда, Петерсон и Ока [34], заключены в пределах от 0.56 до 0.57. Последняя и, по-видимому, наиболее надежная из указанных шкал дает

$$\theta_{эфф} = 0.565.$$

Процедура определения массы \mathcal{M} звезды, принятая в нашей работе, несколько отличается от использованной в [18]: мы сопоставляли M_{bol} и $\theta_{эфф}$ 6 Cas непосредственно с эволюционными треками звезд в области диаграммы $(\lg T_{эфф} - M_{bol})$, занимаемой голубыми и белыми сверхгигантами. Использовано 13 треков, рассчитанных в последние годы для эволюционирующих моделей внутреннего строения звезд с массами от 9 до 30 \mathcal{M}_\odot , причем с наибольшим весом взяты результаты работ [35, 36], в которых рассчитаны модели, медленно проходящие область голубых сверхгигантов. При определении массы 6 Cas привлекалась также полученная в [37] зависимость болометрической светимости голубого сверхгиганта от его массы.

Радиус звезды R в единицах солнечного найден сопоставлением звездных и солнечных значений M_{bol} и $T_{эфф}$. Мы нашли, что

$$\mathcal{M}(6 \text{ Cas})/\mathcal{M}_\odot = 25 \pm 2,$$

$$R(6 \text{ Cas})/R_\odot = 200 \pm 20.$$

Отсюда

$$\lg g_{лин} = 1.24 \pm 0.05.$$

2. Профили и эквивалентные ширины водородных линий, использованные для сопоставления с наблюдаемыми, получены нами следующим образом. За основу были взяты профили линии H_γ , вычисленные Петерсон и Стромом [38] для моделей звездных атмосфер с параметрами: $T_{эфф} \geq 10\,000^\circ$ и $\lg g \geq 2$. В [38] при расчете коэффициента поглощения в линии вместо теории Грима, несколько переоценивающей штарковское уширение, использована полуэмпирическая теория Эдмондса, Шлютера и Уэллса [39], не страдающая, по свидетельству ряда авторов, указанным недостат-

ком. Сопоставление профилей из работ [38] и [40] позволило найти поправки, путем введения которых удалось распространить результаты вычислений Петерсон и Строма на более широкий интервал эффективных температур и ускорений силы тяжести, включающий найденное выше значение $\theta_{эфф}$ и искомое значение $g_{эфф}$ для 6 Cas.

Как видно из рис. 5 и 6, эти поправки сужают теоретические профили и уменьшают эквивалентные ширины водородных линий, что приводит

к увеличению находимых по ним значений $lg g_{эфф}$ на 0.20—0.25, — именно настолько возросло значение $lg g_{эфф}$, полученное в нашей работе, по сравнению с его предварительной оценкой, сделанной в [1]; такое же увеличение отмечается и в [41].

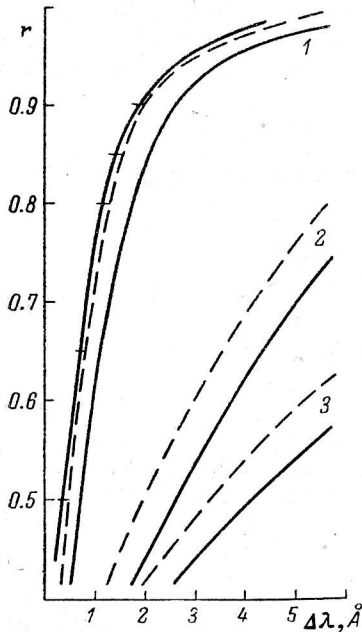


Рис. 5. Профили линии H_γ : наблюдаемый в спектре 6 Cas (жирная линия; горизонтальные штрихи — ошибки наблюдений) и рассчитанные для $\theta_{эфф}=0.565$ в указанных у концов линий значений $lg g$ на основе теории Грима (сплошные линии) и данных работ [39] (штриховые линии). $\Delta\lambda$ — расстояние от центра линии.

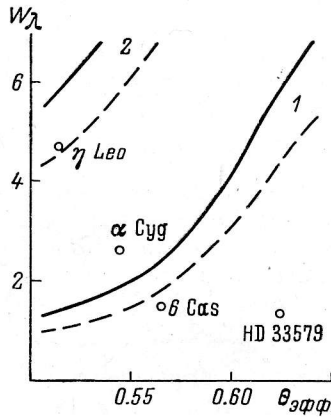


Рис. 6. Зависимости W_λ линии H_γ от $\theta_{эфф}$ для $lg g = 1$ и 2.

Обозначения кривых те же, что и на рис. 5. Точки — наблюдаемые W_λ для сверхгигантов η Leo, α Cyg, 6 Cas и HD 33579.

Интерполяцией были получены теоретические профили и эквивалентные ширины линии H_γ , соответствующие $\theta_{эфф}=0.565$, для трех значений $lg g$: 3, 2 и 1, причем профиль для $lg g=1$ уширен с помощью функции влияния, имитирующей вращение звезды (значение $V_R \cdot \sin i = 35$ км/сек. взято из [13]).

Незначительная экстраполяция зависимости ширин линий H_γ на различных глубинах, а также ее эквивалентной ширины от ускорения силы тяжести дает

$$lg g(\Delta\lambda) = 0.97 \pm 0.03$$

и

$$lg g(W_\lambda) = 0.92 \pm 0.04.$$

Предпочтение следует отдать первому способу определения $lg g$, поскольку использование ширин позволяет исключить влияние эмиссии, нередко искажающей центральные части профилей водородных линий в спектрах сверхгигантов максимальной светимости, тогда как в случае

использования эквивалентных ширин учесть указанное влияние очень трудно. Имея это в виду, мы приняли в качестве среднего значения

$$\lg g_{\text{эфф}} = 0.96 \pm 0.03.$$

Таким образом, эффективная, или «спектроскопическая», величина ускорения силы тяжести оказывается для 6 Cas заметно меньше его «динамической» величины

$$\lg g_{\text{дин}} - \lg g_{\text{эфф}} = \pm 0.28 \pm 0.07.$$

Интересно в связи с этим отметить, что после введения поправок, соответствующих переходу от теории Грима к данным работы [39], найденная в [18] разность между $g_{\text{дин}}$ и $g_{\text{эфф}}$ для большинства исследованных звезд практически исчезает: средние значения величины $(\lg g_{\text{дин}} - \lg g_{\text{эфф}})$ становятся равными -0.01 для сверхгигантов классов светимости Ib и Iab и $+0.06$ для сверхгигантов Ia. Эта величина остается довольно значительной ($+0.24$) лишь для сверхгиганта β Ori, близкого к 6 Cas по болометрической светимости. Отметим также, что для упомянутой выше звезды HD 33579 ($M_{\text{bol}} = -9^{\text{m}}6$) произведенная нами оценка дает $(\lg g_{\text{дин}} - \lg g_{\text{эфф}}) \geq +0.45$.

Спектроскопические проявления нестационарности атмосферы 6 Cas весьма разнообразны. Количественные характеристики различных проявлений даны в табл. 2 для 6 Cas (по нашим данным и данным работ [8, 9]) в сравнении с их средними значениями для сверхгигантов A0—A3, собранными из работ [9, 11, 42, 43]. Помимо величины микротурбулентной скорости и амплитуды ее временных изменений (3-й и 4-й столбцы табл. 2), амплитуды изменений лучевой скорости величины дифференциальных сдвигов линий и «бальмеровского хода»

ТАБЛИЦА 2

Сверхгиганты A0—A3, класс светимости	M_{bol}	v_m , км/сек.	Δv_m , км/сек.	ΔV_r , км/сек.	$\frac{V_r(\text{Si II}, \text{Mg II}) - V_r(\text{Fe I})}{\text{км/сек.}}$	$\frac{V_r(\text{H}_{10}) - V_r(\text{H}_{\beta})}{\text{км/сек.}}$	$\lg g_{\text{дин}} - \lg g_{\text{эфф}}$
Ib	$-6^{\text{m}}0$	5—7	} 2—4	2—3	1—3	} 8—12	-0.01
Ia	$-7^{\text{m}}6$	9—13		5—12	3—6		$+0.06$
6 Cas, Ia+	$-8^{\text{m}}7$	15—16	9	19	16	20	$+0.28$

(Balmer progression) (5-й, 6-й и 7-й столбцы соответственно) признаком нестационарности атмосферы может служить величина превышения «динамического» ускорения силы тяжести над «спектроскопическим» (8-й столбец табл. 2).

Звезда 6 Cas, будучи, по-видимому, одной из наиболее ярких звезд Галактики, особенно наглядно выявляет возрастание всех перечисленных характеристик сверхгигантов со светимостью.

Авторы благодарны И. М. Копылову за неоднократное обсуждение работы в ходе ее выполнения.

Литература

1. Г. И. Аббасов, С. К. Зейналов, Е. Л. Ченцов, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 4, 81, 1972.
2. Г. И. Аббасов, *наст. сборник*, стр. 175.
3. Г. И. Аббасов, в сб. «Новая техника в астрономии», вып. 4, 1972.
4. A. Unsöld. *Physik der Sternatmosphären*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin—Heidelberg—New York, 1968, s. 416.

5. E. P. J. van den Heuvel, Bull. Astron. Inst. Neth., 17, No. 2, 148, 1963.
6. С. К. Зейналов, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 37, 191, 1967.
7. М. Е. Боярчук, Н. Ф. Войханская, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 41—42, 342, 1970.
8. J. D. Rosendhal, G. Wegner, Astrophys. J., 162, No. 2, 547, 1970.
9. С. Аудин, Astron. Astrophys., 19, 369, 1972.
10. C. de Jager, L. Neven, Bull. Astron. Inst. Neth. Suppl., 2, 125, 1967.
11. J. D. Rosendhal, Astrophys. J., 160, No. 2, 627, 1970.
12. J. D. Rosendhal, Astrophys. J., 159, No. 1, 107, 1970.
13. Т. С. Галкина, И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 28, 35, 1962.
14. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 35, 11, 1966.
15. A. Przybylski, Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 139, No. 3, 313, 1968.
16. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 22, 189, 1960.
17. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 23, 148, 1960.
18. И. М. Копылов, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 2, 42, 1970.
19. W. Vuscumbe, Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 144, No. 1, 31, 1969.
20. W. Vuscumbe, Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 148, No. 1, 79, 1970.
21. B. Wolf, Astron. Astrophys., 10, No. 3, 383, 1971.
22. I. Zverko, Bull. Astron. Inst. Czech., 22, No. 1, 49, 1971.
23. W. A. Hiltner, Astrophys. J. Suppl., 2, 389, 1956.
24. И. М. Копылов, Астрон. ж., 35, № 3, 390, 1958.
25. R. Ampel, Acta Astron., 14, No. 1, 52, 1964.
26. M. Vonnau, J. Obs., 50, fasc. 3, 237, 1967.
27. R. M. Humphreys, Astron. J., 75, No. 5, 602, 1970.
28. A. Blaauw, in: Stars and Stellar Systems. Vol. 3. The University of Chicago Press, Chicago and London, 1963, p. 383.
29. M. P. Fitzgerald, Astron. Astrophys., 4, 234, 1970.
30. M. K. V. Varpu, Observatory, 79, No. 910, 100, 1959.
31. H. L. Johnson, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 4, 193, 1966.
32. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 30, 69, 1963.
33. D. Mihalas, Astrophys. J. Suppl., 13, No. 114, 1966.
34. R. Schild, D. M. Peterson, J. B. Oke, Astrophys. J., 166, No. 1, 95, 1971.
35. C. Chiosi, C. Summa, Astrophys. Space Sci., 8, No. 3, 478, 1970.
36. E. E. Simpson, Astrophys. J., 165, No. 2, 295, 1971.
37. R. Stothers, Astrophys. J., 155, No. 3, 935, 1969.
38. D. Peterson, S. E. Strom, Astrophys. J., 157, No. 3, 1341, 1969.
39. F. N. Edmunds, H. Schlüter, D. C. Wells, Mem. Roy. Astron. Soc., 71, 271, 1967.
40. D. Mihalas, Astrophys. J. Suppl., 9, No. 92, 321, 1965.
41. E. C. Olson, Astrophys. J., 153, No. 1, 187, 1968.
42. H. A. Abt, Astrophys. J., 126, No. 1, 138, 1957.
43. E. L. Chentsov, L. I. Snezhko, Proceedings of Symposium on Supergiants Trieste, 1971.

Январь 1972 г.