

УДК 524.3—85

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПОЛОСЫ ПОГЛОЩЕНИЯ В ИК-СПЕКТРАХ М-ГИГАНТОВ

В. З. АВЕТИСЯН, Ю. К. МЕЛИК-АЛАВЕРДЯН

Поступила 8 октября 1981

Принята к печати 3 мая 1982

Приводятся результаты инфракрасных наблюдений гигантов класса М. Полученные данные указывают на наличие в ИК-спектрах исследованных звезд абсорбций, обусловленных наличием молекул H_2O и CO во внешних слоях атмосфер этих звезд или, возможно, в их оболочках. Оцениваются параметры этих оболочек и рассматривается зависимость полученных значений параметров от периодов и фазы изменения блеска.

Холодные гиганты относятся к одному из наиболее интересных классов звезд. С их изучением связано много проблем [1], не нашедших до сих пор своего решения.

С появлением приемников инфракрасного излучения холодные гиганты стали интенсивно исследоваться в инфракрасном диапазоне. Оказалось, что часть наблюдавшихся в инфракрасном диапазоне звезд имеет избыточное инфракрасное излучение, обусловленное, вероятно, пылевыми оболочками. Спектральные инфракрасные наблюдения холодных гигантов показали наличие в их спектрах колебательно-вращательных абсорбционных полос молекул, в частности, молекул H_2O и CO [2, 3]. По-видимому, наблюдения молекулярных полос дают нам сведения о наиболее внешних областях протяженных атмосфер этих звезд. А эти данные необходимы для понимания структуры атмосфер красных гигантов, объяснения причин потери ими массы и образования оболочек.

Исходя из этого, в Бюраканской астрофизической обсерватории АН Арм.ССР, начиная с 1978 г., ведутся систематические инфракрасные наблюдения красных гигантов. Наблюдения проводятся с помощью изготовленного в ГАО АН СССР инфракрасного фотометра, установленного на телескопе ЭТА-2.6 м. Детектором инфракрасного излучения в этом фотометре является охлаждаемое углекислотой фотоспротивление PbS . Фотометр снабжен 10-ю интерференционными фильтрами, характеристики которых приводятся в табл. 1.

Для калибровки фотометра в качестве стандартов использовались звезды α Cyg, α Arg, β Gem, δ Vir. Так как мы не располагали данными наблюдений указанных стандартов в области пропускания наших фильтров, то для обработки данных пришлось воспользоваться интерполяцией результатов [4]. Поэтому наша калибровка носит условный характер.

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ФИЛЬТРОВ

λ мкм	0.98	1.47	1.54	1.72	1.75	1.98	2.02	2.17	2.23	2.39
$\Delta\lambda$ мкм	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04
$\tau_{0.0}$	24	42	62	57	34	52	58	62	62	68

Программа наблюдений приводится в табл. 2. В этой же таблице приводится воздушная масса в момент наблюдения. Редукция наблюдаемых потоков за избирательность поглощения в атмосфере выполнялась путем учета поправок за различие воздушных масс исследуемой звезды и звезды-стандарта. Избирательное поглощение на единицу воздушной массы принималось согласно [5]. Хотя мы не проверяли применимость данных [5] для наших условий наблюдений, однако можно надеяться, что возможная ошибка здесь будет невелика, так как стандарты и исследуемые звезды наблюдались при достаточно близких воздушных массах, и поправки не превышали нескольких сотых звездной величины.

Для наблюдавшихся звезд мы вычислили наблюдаемые цвета $[i] - [1.54]$ по формуле:

$$[i] - [1.54] = -2.5 \lg \frac{F_i}{F_{1.54}} + C_i \quad (1)$$

где F_i — наблюдаемые потоки, исправленные за атмосферное поглощение, C_i — определенные по наблюдениям стандартов калибровочные коэффициенты. Полученные таким образом цвета мы исправили за межзвездное поглощение, расстояния оценивались по модулю расстояния, причем абсолютные звездные величины были взяты из [5], видимые — из [6]. В высоких галактических широтах ($|b| > 8^\circ$) межзвездное поглощение в визуальных лучах принималось $0.^m3$ на кпс [5], а для $|b| < 8^\circ$ использовались соответствующие значения из [7]. Для пересчета визуального поглощения на длину волны λ принималось, что $A_\lambda \sim 1/\lambda$.

Исправленные таким образом за межзвездное поглощение цвета $[i] - [1.54]$ наблюдавшихся нами звезд и сравнение этих цветов с соответствующими цветами, полученными широкополосной фотометрией [8] холодных гигантов, приводятся на рис. 1.

Таблица 2

№	Звезда	Дата (JD)	Воздушная масса	№	Звезда	Дата (JD)	Воздушная масса
1	T Cep	2443767	1.18	23	RS Vir	2444002	2.00
2	W Cyg	43772	1.08	24	T UMi	44003	1.19
3	R Ari	43772	1.06	25	RS Vir	44003	1.27
4	R Del	43774	1.18	26	Y Lyb	44003	1.47
5	T And	43774	1.05	27	S Ser	44003	1.24
6	T Cep	43775	1.27	28	X CrB	44003	1.10
7	R Ari	43797	1.24	29	U Ser	44004	1.24
8	R Leo	43948	1.21	30	S Lib	44004	2.13
9	W Cyg	43948	1.74	31	RY Oph	44004	1.33
10	R Cnc	43949	1.62	32	U Her	44005	1.14
11	R Vir	43949	1.21	33	RY Oph	44005	1.33
12	R CVn	43949	1.00	34	R Aql	44064	1.18
13	S UMi	43949	1.29	35	Z Oph	44065	1.29
14	S GrB	43949	1.06	36	T And	44127	1.09
15	W Cnc	43974	1.27	37	W Cyg	44130	1.04
16	S LMi	43974	2.21	38	T Cep	44130	1.22
17	RU UMa	43974	1.10	39	R Ari	44130	1.06
18	U Vir	43974	1.56	40	W Cyg	44145	1.27
19	S Vir	33974	1.89	41	W Cyg	44149	1.07
20	T Vir	43980	1.49	42	W Cyg	44179	1.08
21	R Hya	43980	2.28	43	R Ari	44179	1.04
22	RT Lyb	43980	2.00				

Наиболее характерными особенностями полученных спектров холодных гигантов является наличие абсорбции H_2O на 1.98 мкм и CO на 2.39 мкм. Наличие этих деталей в инфракрасных спектрах холодных звезд неоднократно отмечалось и ранее [2, 3]. В настоящей работе мы попытаемся, не ограничиваясь констатацией факта наличия этих абсорбционных деталей в спектре исследуемых звезд, выполнить и количественный анализ этих спектров.

Прежде всего, оценим обусловленное молекулами H_2O и CO ослабление интенсивности инфракрасного излучения исследованных звезд. Для оценки молекулярных абсорбций можно использовать, например, величины Δm_{CO} и Δm_{H_2O} , определяемые нижеследующими выражениями:

$$\Delta m_{CO} = \{[2.39] - [1.54]\} - \{[2.23] - [1.54]\} - \{[2.39] - [2.23]\}, \quad (2)$$

$$\Delta m_{H_2O} = \{[1.98] - [1.54]\} - \frac{\{[1.72] - [1.54]\} + \{[2.23] - [1.54]\}}{2}, \quad (3)$$

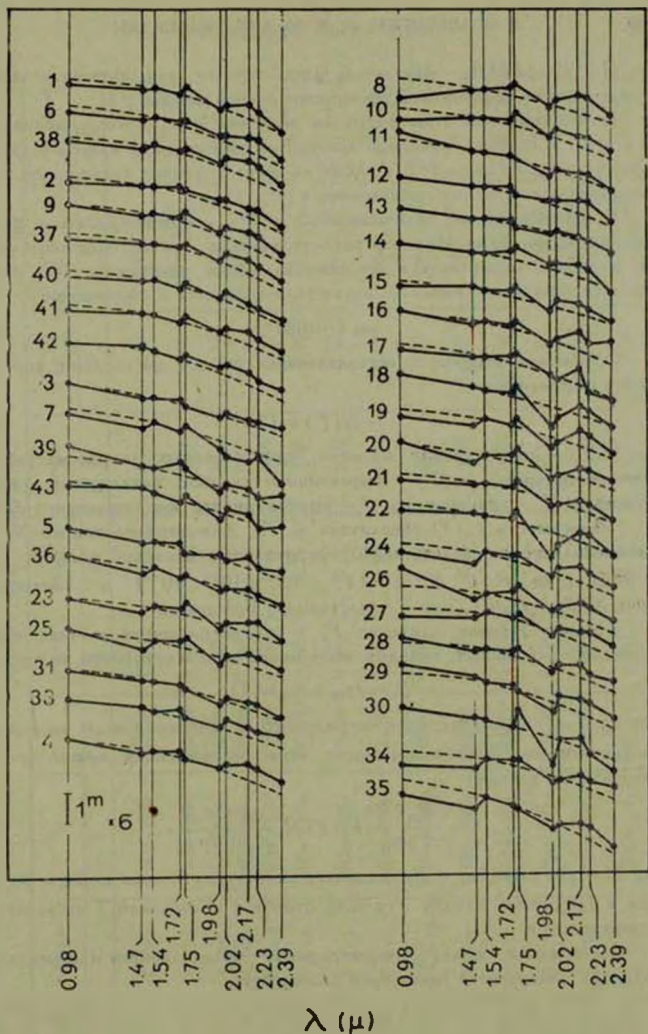


Рис. 1. Цвета ($I - [1.54]$) исследованных звезд (точки). Прерывистые линии показывают цвета черного тела с температурой, равной эффективной температуре данной звезды.

где $\{[2.39] - [2.23]\}_e$ — показатель цвета черного тела, имеющего температуру, равную эффективной температуре данной звезды.

Рассчитанные по этим формулам значения Δm_{CO} и $\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$ приводятся в табл. 3. В этой же таблице приводятся спектральные классы исследованных звезд, согласно [6], а также их фазы в момент наблюдения, рассчитанные для периодов, приведенных в табл. [6].

С другой стороны, величины Δm_{CO} и $\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$ можно связать с физическими параметрами атмосфер рассматриваемых звезд. Действительно, как известно, выраженное в звездных величинах уменьшение Δm интенсивности излучения связано с оптической толщиной τ соотношением:

$$\Delta m = 1.086 \tau, \quad (4)$$

Оптическая толщина τ , обусловленная только молекулами, определяется выражением:

$$\tau = N(T) k_e(T) l, \quad (5)$$

где $N(T)$ — концентрация молекул, ответственных за рассматриваемую экстинкцию, $k_e(T)$ — эффективное сечение поглощения одной молекулы, T — температура, l — протяженность поглощающего слоя.

Зависимость $k_e(T)$ рассчитана в [9]. Для определения же $N(T)$ мы воспользуемся расчетами [10] парциальных давлений молекул CO и H₂O (для H:C:N:O = 1:5 × 10⁻⁴: 10⁻⁴: 10⁻³) и соотношением $N(T) = P_M/kT$, где k — постоянная Больцмана.

Полное газовое давление P_g в рассматриваемых звездах определяется, в основном, вкладом атомарного и молекулярного водорода:

$$P_g = (n_H + n_{\text{H}_2}) k T, \quad (6)$$

где n_H и n_{H_2} — концентрации атомарного и молекулярного водорода соответственно. Воспользовавшись этим соотношением, можно преобразовать (5) к виду:

$$\tau = \frac{P_M(T)}{P_g m_H} k_e(T) M \frac{n_H + n_{\text{H}_2}}{n_H + 2n_{\text{H}_2}}, \quad (7)$$

где $M = m_H l (n_H + 2n_{\text{H}_2})$ представляет собой практически полную массу газа в единичном столбе (то есть столбе с основанием 1 см²) поглощающего слоя.

Соотношение между концентрациями молекулярного и атомарного водорода определяется уравнением диссоциации:

$$\frac{n_H^2}{n_{\text{H}_2}} = \frac{k_d(T)}{kT}, \quad (8)$$

где $k(T)$ — постоянная диссоциации, рассчитанная в [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

№	Звезда	S_p	P	Фаза	Δm_{H_2O}	Δm_{CO}
1	2	3	4	5	6	7
1	T Cep	M5e—M9e	387.79	0.024	0.24	0.37
2	W Cyg	M4e—M6e	130.85	0.023	0.13	0.20
3	R Ari	M3e—M4e	186.80	0.051	0.20	-0.03
4	R Del	M5e—M6e	280.19	0.976	0.26	0.07
5	T And	M3e—M4e	284.88	0.132	0.04	-0.09
6	T Cep	M5e—M9e	387.79	0.045	0.21	0.23
7	R Ari	M3e—M4e	186.80	0.185	0.18	0.70
8	R Leo	M6.5e—M9e	312.57	0.144	0.40	0.24
9	W Cyg	M4e—M6e	130.85	0.368	0.29	0.23
10	R Cnc	M6e—M8e	361.69	0.190	0.33	0.17
11	R Vir	M3.5e—M8e	145.51	0.190	0.32	0.25
12	R CVn	M6e—M8e	327.97	0.178	0.24	0.34
13	S UMi	M7e—M9e	326.19	0.143	0.16	0.21
14	S CrB	M6e—M8e	360.68	0.143	0.12	0.44

Таблица 3

$\lg \frac{\Delta m_{CO}}{\Delta m_{H_2O}}$	$T (K)$	$M \text{ г/см}^2$
8	9	10
0.19	2710^{+70}_{-90}	$2.8^{+0.2}_{-0.2}$
0.19	2710^{+170}_{-200}	$1.5^{+0.3}_{-0.1}$
0.15	2690	—
-0.56	< 2660	> 0.5
—	—	—
0.04	2670^{+110}_{-180}	$1.8^{+0.4}_{-0.2}$
0.59	2800^{+80}_{-60}	$4.9^{+0.2}_{-0.1}$
-0.22	2560^{+120}_{-}	$2.1^{+0.3}_{-0.3}$
-0.10	2620^{+120}_{-230}	$1.9^{+0.5}_{-0.2}$
-0.29	2540^{+140}_{-}	$1.5^{+0.2}_{-0.2}$
-0.11	2610^{+100}_{-180}	$2.1^{+0.4}_{-0.2}$
0.15	2700^{+80}_{-100}	$2.6^{+0.2}_{-0.2}$
0.12	2690^{+120}_{-220}	$1.6^{+0.4}_{-0.1}$
0.56	2790^{+170}_{+200}	$3.1^{+0.5}_{-0.2}$

ИК-СПЕКТРЫ М.ГИГАНТОВ

1	2	3	4	5	6	7
15	W Cnc	M7e—M8e	393.26	0.191	0.36	0.18
16	S LMi	M4e—M5e	233.91	0.333	0.40	—0.38
17	RU UMa	M3e—M5e	252.44	0.306	0.06	0.04
18	U Vir	M2e—M5.5e	206.84	0.218	0.91	0.34
19	S Vir	M6e—M7e	377.88	0.990	0.63	0.30
20	T Vir	M6e	339.24	0.995	0.53	0.06
21	R Hya	M6e—M8e	388.00	0.075	0.34	0.26
22	RT L.yb	M3e—M5.5e	251.74	0.979	0.98	0.46
23	RT Vir	M6e—M7e	352.80	0.079	0.54	0.31
24	T UMi	M5.5e	313.58	0.220	0.42	0.18
25	RS Vir	M6e—M7e	352.80	0.082	0.57	0.19
26	Y Lyh	M5e	274.74	0.044	0.40	0.00
27	S Ser	M5e—M6e	368.59	0.283	0.34	0.01
28	X CrB	M5e—M7e	240.82	0.267	0.35	—0.05
29	U Ser	M4e—M6e	237.80	0.032	0.54	0.03
30	S Lih	M2e	192.37	0.066	0.83	0.32
31	RY Oph	M3e—M6e	150.53	0.997	0.36	0.17

Таблица 3 (продолжение)

8	9	10
-0.30	2530 ⁺¹⁴⁰ _—	1.6 [—] _{-0.2}
—	—	—
—	—	—
-0.43	2440 ⁺¹¹⁰ _—	3.4 [—] _{-0.4}
-0.32	2530 ⁺⁵⁰ _—	2.7 [—] _{-0.1}
-0.94	2440	>0.6
-0.12	2610 ⁺¹⁰⁰ ₋₁₇₀	2.2 ^{+0.4} _{-0.3}
-0.33	2530 ⁺⁵⁰ ₋₁₃₀	4.1 ^{+0.7} _{-0.1}
-0.24	2560 ⁺⁸⁰ ₋₁₈₀	2.7 ^{+0.6} _{-0.2}
-0.36	2500 ⁺¹³⁰ _—	1.7 [—] _{-0.2}
-0.48	2390 ⁺¹⁹⁰ _—	2.0 [—] _{-0.4}
—	< 2390	—
-1.53	< 2510	>0.1
—	—	—
-1.25	—	—
-0.41	2470 ⁺⁹⁰ _—	3.1 [—] _{-0.4}
-0.33	2530 ⁺¹³⁰ _—	1.5 [—] _{-0.2}

В. З. АВЕТИСЯН, Ю. К. МЕЛИК-АДАВЕДЯН

1	2	3	4	5	6
32	U Her	M6.5e—M8e	405.40	0.750	0.73
33	RY Oph	M3e—M6e	150.53	0.003	0.32
34	R Aql	M5e—M8e	293.00	0.744	0.48
35	Z Oph	M4e—M5.5e	349.10	0.146	0.44
36	T And	M3e—M4e	284.88	0.391	0.16
37	W Cyg	M4e—M6e	130.85	0.759	0.22
38	T Cep	M5e—M9e	387.79	0.960	0.17
39	R Ari	M3e—M4e	186.80	0.968	0.51
40	W Cyg	M4e—M6e	130.85	0.874	0.06
41	W Cyg	M4e—M6e	130.85	0.904	0.11
42	W Cyg	M4e—M6e	130.85	0.132	-0.03
43	R Ari	M3e—M6e	186.80	0.230	0.23

Таблица 3 (окончание)

7	8	9	10
0.30	-0.38	2480^{+100}_{-}	$2.9^{+}_{-0.3}$
-0.08	—	—	—
-0.22	—	—	—
0.31	-0.25	2560^{+120}_{-100}	$2.7^{+0.3}_{-0.3}$
0.01	-2.00	< 2730	> 0.1
0.04	0.74	< 2680	> 0.3
0.24	0.15	2700^{+110}_{-140}	$1.8^{+0.3}_{-0.1}$
-0.33	—	—	—
-0.01	—	—	—
0.02	-0.74	< 2890	> 0.1
-0.19	—	—	—
-0.30	—	—	—

ИКСПЕКТРЫ М.ГИГАНТОВ

Воспользовавшись (6) и (8), преобразуем (7) следующим образом:

$$\tau = \frac{P_M(T)}{P_g m_H} k_s(T) M \frac{1}{2 - \frac{k_s(T)}{2P_g} \left(\sqrt{1 + \frac{4P_g}{k_s(T)}} - 1 \right)}. \quad (9)$$

Соотношение (9), строго говоря, можно применить лишь для предельно малого увеличения τ в шаровом слое, имеющем температуру T , газовое давление P_g и содержащем массу M в столбе с единичным основанием. Очевидно, что, располагая моделями атмосфер рассматриваемых звезд, можно рассчитать τ . Однако, поскольку у нас нет уверенности в применимости имеющихся моделей к областям, ответственным за образование молекулярных полос поглощения, мы поступим иначе. А именно, предположим, что наблюдаемые в спектрах исследованных звезд полосы поглощения молекул H_2O и CO возникают в одних и тех же областях с фиксированными для данной звезды значениями T и P_g . Более того, поскольку τ гораздо сильнее зависит от T , чем от P_g , будем пренебрегать зависимостью τ от P_g , полагая, например, что $P_g = 10^3$ для рассматриваемых здесь звезд.

Конечно, такие предположения являются весьма грубыми. Особенно большие сомнения вызывает предположение, что области, ответственные за возникновение полос поглощения как молекул H_2O , так и молекул CO , характеризуются одной и той же для данной звезды температурой. Только в том случае, когда поглощающий молекулярный слой представляет собой тонкую, достаточно однородную по своим свойствам оболочку, это предположение будет оправдано. Ниже мы будем рассматривать именно этот случай.

Итак, мы приняли $\tau = F(T) M$. Следовательно, определив из наблюдений значения τ и рассчитав $F(T)$, мы сможем определить для каждой звезды значения M . Расчет зависимости $F(T)$ не представляет трудностей; соответствующие кривые для молекул CO и H_2O , полученные с помощью данных [9, 10], приводятся на рис. 2. Температуру T для каждой звезды можем определить, заметив, что отношение $\Delta m_{\text{CO}}/\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$ при сделанных предположениях зависит только от T . Рассчитанная нами зависимость $\Delta m_{\text{CO}}/\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$ от T (сплошная кривая) приводится на рис. 3. С другой стороны, мы имеем (см. табл. 3) наблюдаемые значения отношения $\Delta m_{\text{CO}}/\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$. Сравнивая эти данные с приведенной на рис. 3 зависимостью, мы определили значения T , которые приводятся в табл. 3. Вычислены также интервалы значений T , соответствующие среднеквадратичной ошибке наших наблюдательных данных (в некоторых случаях наши данные позволяют оценить лишь верхний предел T).

Представляется интересным сравнить эти значения T с эффективными температурами соответствующих звезд. С этой целью мы приводим на рис. 3 диаграмму $\Delta m_{\text{CO}}/\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$ — эффективные температуры всех исследо-

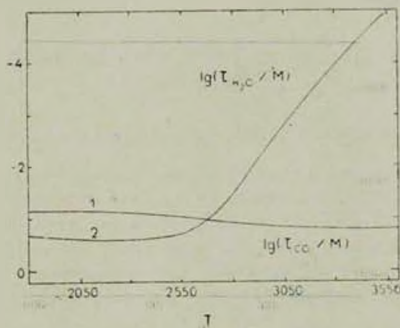


Рис. 2. Зависимость I_{CO}/M и $I_{\text{H}_2\text{O}}/M$ от температуры (кривые 1 и 2 соответственно).

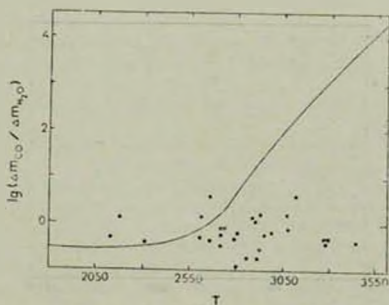


Рис. 3. Зависимость $\Delta m_{\text{CO}}/\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$ от температуры (кривая) и наблюдаемые значения $\Delta m_{\text{CO}}/\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$ (точки), показанные против эффективных температур соответствующих звезд.

ванных звезд. Напомним, что приведенная на этом рисунке кривая показывает зависимость между T и $\Delta m_{\text{CO}}/\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$. Сравнение этой рассчитанной зависимости с наблюдательными данными показывает, что эффективные температуры большинства исследованных звезд существенно выше, чем температуры T областей, ответственных за поглощение в молекулярных

полосах. Особенно велико различие в T и T_e для звезд U Ser, RT Lib, U Vir, RY Oph. Для некоторых из исследованных звезд, как например, S UMi, W Sps, U Her, температуры T оказались выше эффективных температур.

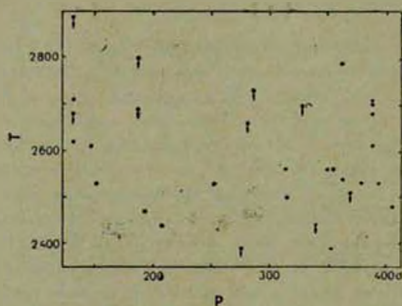


Рис. 4. Диаграмма $T - P$ для исследованных звезд.

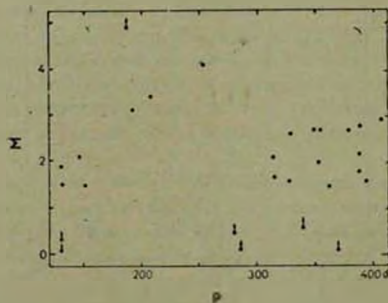


Рис. 5. Диаграмма $M - P$ для исследованных звезд.

Зная температуры T , мы можем теперь с помощью (9) найти массы вещества, содержащегося в единичном столбе поглощающего в молекулярных полосах слоя. Полученные значения M , а также доверительные интервалы соответствующих значений приводятся в табл. 3. На рис. 4 и 5 значения M и T сопоставлены с периодами P изменения блеска соответствующих звезд. Видна некоторая тенденция к увеличению T с увеличением P

для долгопериодических звезд с $P > 200$ дней. Имеются также некоторые указания на изменение T с фазой, например, у звезд τ Сеп и ω Сыз.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

MOLECULAR ABSORPTION BANDS IN IR SPECTRA OF M GIANTS

V. Z. AVETISSIAN, Yu. K. MELIK-ALAEVERDIAN

The results of observations of M-type giants are given. The obtained data indicate the presence of absorption in the infrared spectra of the observed stars. The absorption is caused by molecules H_2O and CO which exist in the outer layers of stellar atmospheres or in their envelopes. The parameters of the envelopes are estimated. The dependence of their values upon periods and phases of luminosity changes is considered.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. W. Merrill, *Spectra of Long-Period Variable Stars*, Chicago, University of Chicago Press, 1940.
2. D. Mc. Cammon, G. Munch, G. Neugebauer, *Ap. J.*, 147, 575, 1967.
3. R. I. Thompson, H. W. Schnopper, R. I. Mitchell, H. L. Johnson, *Ap. J.*, 158, L117, 1969.
4. R. G. Walker, *Philosophical Transactions R. S. of London, Ser. A*, No. 1150, 264, p. 209.
5. G. W. Allen, *Astrophysical Quantities*, The Athlone Press, London, 1973.
6. B. V. Kukarkin, P. N. Kholopov, Yu. P. Pskovsky, Yu. N. Efremov, N. P. Kukarkina, N. E. Kurochkin, G. I. Medvedeva, N. B. Parova, V. P. Fedorovich, M. S. Frolov, *General Catalogue of Variable Stars*, Moscow, 1971.
7. Th. Neckel, G. Klare, *Astron. Astrophys.*, 42, 251, 1980.
8. H. L. Johnson, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 4, 193, 1966.
9. T. Tsuji, *P. A. S. Japan*, 18, 127, 1966.
10. T. Tsuji, *Ann. Tokyo Astron. Obs. Second Ser.*, 9, No. 1, 1964.