

УДК: 524.318.7—852—355

АНАЛИЗ МОЛЕКУЛЯРНОГО СПЕКТРА N-ЗВЕЗД
НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР

С. Е. НЕРСИСЯН, А. В. ШАВРИНА, А. А. ЯРЕМЧУК

Поступила 18 мая 1988

Принята к печати 25 июня 1988

Определены содержания С, N и O в атмосферах 23 N-звезд на основе спектрограмм, полученных на 2.6-м телескопе Бюраканской астрофизической обсерватории. Использовался метод сравнения наблюдаемого спектра с теоретическим, рассчитанным на основе моделей атмосфер, учтено молекулярное поглощение.

1. *Введение.* Спектры N-звезд в видимой области спектра характеризуются сильными молекулярными полосами, самые интенсивные из которых — полосы C_2 системы Свана, переход $d^3\Pi_g — a^3\Pi_u$. Их интенсивность пропорциональна отношению содержаний углерода и кислорода в атмосферах этих звезд, которое в углеродных звездах, в отличие от звезд кислородной последовательности, всегда больше единицы. Вид спектра особенно чувствителен к отношению C/O, когда оно близко к единице. Это происходит от того, что в поздних звездах либо почти весь кислород, либо почти весь углерод связан в молекулы CO, а остатки более обильного из этих двух элементов идут на образование в одном случае окислов, а в другом — других углеродных соединений. Кроме молекул C_2 , в спектрах N-звезд отождествлены в инфракрасной области спектра полосы CO, в видимой — CH, MgH, SiC₂, CaCl. При самых низких температурах растет роль поглощения многоатомными молекулами.

Содержание С, N и O в атмосферах углеродных звезд определяется, в основном, методом синтетического спектра на участке измеряемых молекулярных полос. Путем сравнения наблюдаемых спектров с теоретическими можно сделать заключение о распространенности этих элементов как продуктов CNO-цикла или 3 α -процесса.

Целью настоящей работы является определение содержаний С, N и O в атмосферах N-звезд. Для анализа мы использовали спектрограммы 23 N-звезд в диапазоне длин волн от 4000 до 6700 Å, с дисперсией 136 Å/мм, полученные с помощью спектрографа UAGS, установленного в фокусе Нэсмита 2.6-м телескопа Бюраканской астрофизической обсерватории.

2. *Расчет теоретического спектра.* В видимой области спектра расположены, в основном, электронно-колебательные полосы двухатомных молекул, которые при достаточно хорошем спектральном разрешении разделяются на отдельные вращательные линии или бленды линий. При умеренном разрешении вращательная структура полос не просматривается и для анализа обычно используют те или иные модели полос в зависимости от их структуры. Для электронно-колебательных полос двухатомных молекул в видимой области спектра можно использовать так называемое приближение «смазанных линий». Основное допущение этого приближения состоит в том, что на любом интервале длин волн число вращательных линий так велико, что характеристики отдельных линий не принимаются во внимание и распределение интенсивности в полосе рассматривается как непрерывное.

В настоящей работе нами предпринята попытка описать спектры избранных N-звезд на основе моделей Джонсона [1], рассчитанных специально для N-звезд с эффективными температурами $T_{eff} = 2500, 3000, 3250$ и 3500 К, ускорением силы тяжести на поверхности $\lg g = 0.0$ и отношениями $C/O = 1.0, 1.02, 1.05, 1.20$ и 2.00 . Эти модели рассчитаны при стандартных допущениях ЛТР, постоянства потока и гидростатического равновесия в плоскопараллельной геометрии. Кроме обычной непрозрачности за счет водорода, учтено поглощение в молекулярных линиях CN, CO, C_2 , TiO, NH, CH, OH и MgH (методом «opacity sampling»). Непрозрачность за счет H_2O включалась методом прямого среднего. В работе [1] отмечается, что изменение содержания азота оказывает незначительное влияние на структуру атмосфер углеродных звезд, т. е. эти модели можно использовать для расчетов спектра с изменяющимся содержанием азота. Мы также использовали для анализа модели с $T_{eff} = 2750$ К, полученные нами путем интерполирования моделей с $T_{eff} = 2500$ и 3000 К. Наблюдаемые спектры были выражены в логарифмах отношений интенсивностей $F_i / F_{5558 \text{ \AA}}$. В таких же единицах для удобства сравнения рассчитывался теоретический спектр на основе моделей атмосфер и модели «смазанных линий» с учетом мультиплетного расщепления электронных переходов и разделения вращательных ветвей. Список молекул, учитываемых в расчетах, приведен в табл. 1 вместе с принятыми значениями сил осцилляторов электронных переходов f_e [2, 3]. Концентрации молекул в каждом слое модели рассчитывались по программе термохимического равновесия [4], включающей 58 химических элементов (нейтральные атомы и первые ионы). 233 молекулы, 21 отрицательный молекулярный ион. Потенциалы диссоциации и суммы по состояниям для молекул взяты из работы [5]. В необходимых случаях потенциалы диссоциации были исправлены в соответствии с данными работ [3, 5, 6] (см. табл. 1).

Таблица 1

Молекула	Переход	f_e	D_0 , эВ
CH	$B^2\Sigma - X^2\Pi$	0.032 [12]	3.48 [15]
CH	$A^2\Delta - X^2\Pi$	0.0056 [12]	3.48 [15]
CN, синяя	$B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$	0.036 [12]	7.60 [16]
CN, красная	$A^2\Pi - X^2\Sigma^+$	0.0064 [12]	7.60 [16]
C ₂ , Свана	$d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$	0.033 [12]	6.14 [15]
MgH	$A^2\Pi - X^2\Sigma^+$	0.161 [13]	1.27 [13]

Поток в каждой длине волны (с интервалом 5 Å) рассчитывался по формуле

$$F_\lambda = 2 \int_0^{\tau_\lambda} S_\lambda(\tau_\lambda) E_2(\tau_\lambda) d\tau,$$

где S_λ — функция источника, $E_2(\tau_\lambda)$ — вторая экспоненциально-интегральная функция.

Оптическая глубина τ_λ вычислялась из выражения

$$d\tau_\lambda = k_\lambda d\tau_0/k_0,$$

где τ_0 и k_0 — оптическая глубина и коэффициент поглощения, взятые из модели атмосферы, k_λ — полный коэффициент поглощения на длине волны λ определялся выражением

$$k_\lambda = k_\lambda^c + \sum_v \sum_{v''} k_\lambda(v'v''),$$

k_λ^c — коэффициент поглощения в непрерывном спектре, $k_\lambda(v'v'')$ — коэффициент поглощения в полосе $v'v''$, суммирование ведется по всем колебательным полосам системы с v' , v'' от 1 до 10 и по всем электронным системам полос всех учитываемых молекул ($\sum$).

При расчете коэффициента непрерывного поглощения нами учтены следующие источники непрозрачности: H_{bf}^- , H_{bf} , H_{ff} , $(H_2^+)^-_{bf, ff}$, $(MgI)_{bf, ff}$, $(SiI)_{bf, ff}$, $(Cl, AlI)_{bf}$, резонансное рассеяние на H и H₂ и томпоновское рассеяние на свободных электронах.

Коэффициент поглощения в приближении «смазанных линий» записывается в виде [7]

$$k_{v'v''}(v) = B \frac{q_{v'v''} q_{v'v''}}{v_{00}(B_{v'} - B_{v''})} \exp \left\{ -\frac{hc}{kT} \left[G_{v'} + \frac{B_{v'}(v - v_{v'v''})}{B_{v'} - B_{v''}} \right] \right\}, \quad (1)$$

где

$$\Omega_{v',v''} = \nu_{v',v''} - \frac{1}{4} \frac{(B_{v'} + B_{v''})^2}{B_{v'} - B_{v''}}. \quad (2)$$

$\Omega_{v',v''}$ — частота перехода кванта полосы

$$B = \frac{\pi e^3}{mc^2} N \frac{q \cdot f_e}{Q} \exp\left(-\frac{hc T_e}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{hc \nu}{kT}\right)\right], \quad (3)$$

$B_{v'}$ и $B_{v''}$ — вращательные константы для верхнего и нижнего уровней.

Частота перехода $\nu = T_e' - T_e'' + G_{v'} - G_{v''}$. $G_{v'}$ и $G_{v''}$, T_e' и T_e'' — колебательные и электронные энергии соответственно верхнего и нижнего колебательных (v) и электронных (e) уровней энергии, $q_{v',v''}$ — вероятность колебательного перехода (фактор Франка-Кондона). Величины $q_{v',v''}$ для всех молекул взяты из [8], остальные молекулярные константы — из [9]. Отношение статистического веса перехода g к сумме по состояниям Q можно записать

$$\frac{g}{Q} = \frac{g_{vib} \cdot g_{el}}{Q_{vib} \cdot Q_{el}},$$

где g_{vib} и g_{el} — соответственно колебательный и электронный статистический вес: $g_{vib} = 1$, $g_{el} = (2 - \delta_{0,\lambda''}) (2s'' + 1)$. Здесь $\delta_{0,\lambda''}$ — символ Кронекера, λ'' — квантовое число углового момента ($\delta_{0,\lambda''} = 1$, если $\lambda'' \neq 0$ и $\delta_{0,\lambda''} = 0$, если $\lambda'' = 0$), s'' — полный спиновый момент нижнего уровня, Q_{vib} и Q_{el} — соответствующие суммы по состояниям.

$$Q_{vib} = \sum_{v''=0}^{v''_{\max}} g_{vib} \cdot e^{-\left(\frac{hc}{kT_{vib}} \cdot G_{v''}\right)},$$

$$Q_{el} = \sum_i g_{el} \cdot e^{-\left(\frac{hc}{kT_e} \cdot T_e''\right)}.$$

Поглощение в атомных линиях нами не учитывалось, поскольку оно в N-звездах значительно меньше молекулярного. Кроме того, можно сделать предположение о равномерном распределении атомных линий по всему видимому спектру. Тогда влияние их на относительные потоки F_λ / F_{5556A} будет незначительно.

3. *Определение T_{eff} , C/O и содержания азота.* Анализ полос молекул, содержащих C, N и O, можно использовать для определения содержаний этих элементов. Но такой анализ сопряжен с большими трудностями. Это, во-первых, малая точность молекулярных констант (в основном, потенциалов диссоциации и сил осцилляторов). Во-вторых, сильное blending множества полос различных электронных систем и молекул. Кроме этого, модели атмосфер для низкотемпературных звезд не могут считаться достаточно точными из-за неполноты знания об источниках непрозрачности.

В процессе анализа из сравнения теоретического распределения энергии с наблюдаемым мы должны подобрать T_{eff} и C/O для выбранных N-звезд. Вначале мы приняли гипотезу о солнечном содержании азота в атмосферах N-звезд, как в работах [10, 11]. Содержание кислорода принято как в [6]. При этом мы пробовали изменять содержание азота для лучшего описания интенсивности полос в некоторых звездах. Как отмечалось в [1], изменение содержания азота мало влияет на структуру моделей, поэтому мы могли использовать те же модели [1] при изменении N (каждый раз пересчитывалось лишь химическое равновесие на каждом τ модели).

Из соотношений (1)—(3) видно, что коэффициент поглощения в полосе (интенсивность полосы поглощения) пропорционален содержанию молекулы и силе осциллятора (внутри одной системы полос — фактору Фрэнка—Кондона). Температурная зависимость коэффициента поглощения определяется бoльцмановским фактором. Она неодинакова для полос с различными колебательными квантовыми числами v . Эту особенность обычно используют для определения колебательных температур в атмосферах звезд, которые коррелируют с эффективными температурами (см., например, в [12]). Наши расчеты показали, что наиболее чувствительна к изменению T_{eff} область спектра вблизи полосы (1, 0) системы Свана C_2 , 4730 А. Это, по-видимому, можно объяснить следующим образом. Нами рассчитаны потоки относительно F_{5556A} , а эта точка лежит вблизи минимума другой полосы системы Свана (0, 1), λ 5635 А. Указанные полосы имеют примерно равные вероятности колебательных переходов, а образуются с различных колебательных уровней ($v'' = 0$ и 1), и их отношение чувствительно к изменению температуры через бoльцмановский фактор в выражениях (1)—(3). Кроме того, эти полосы достаточно далеко отстоят друг от друга по длине волны, и соотношение потоков в них зависит от температуры по известной формуле Планка (при допущении ЛТР).

При изменении отношения C/O интенсивности всех полос Свана изменяются одинаково, пропорционально содержанию C_2 (если полосы не насыщены), т. е. соотношение минимумов полос сохраняется при изменении C/O. Но чувствительны к изменению C/O максимумы полос, особенно

максимум полосы (0, 0) у λ 5170 А, имеющей большую вероятность перехода ($q_{0,0} = 0.724$, $q_{1,0} = 0.246$, $q_{1,1} = 0.220$). При этом интенсивности полос других молекул тоже зависят от отношения C/O (за счет изменения концентраций молекул). При расчете химического равновесия хорошо заметно изменение поглощения в синей и красной системах полос CN.

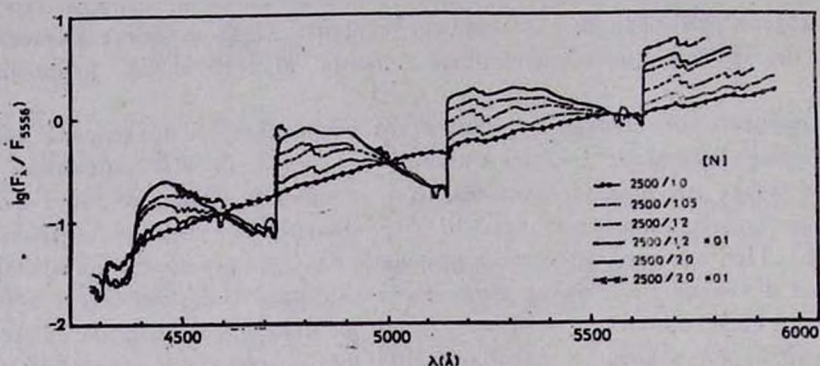


Рис. 1. Теоретическое распределение энергии при различных значениях T_{eff} и C/O.

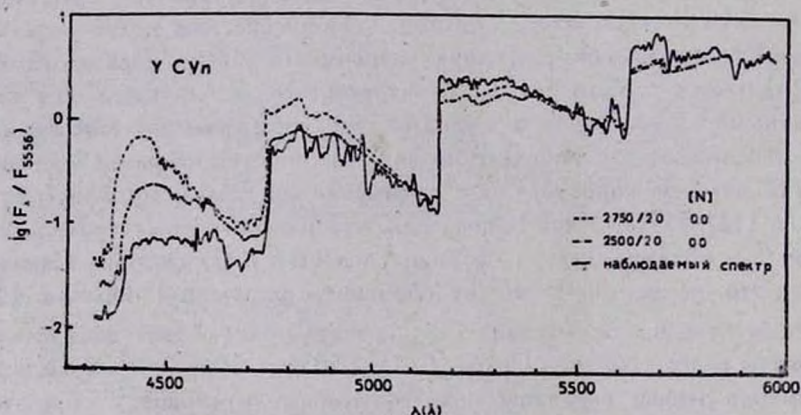


Рис. 2. Сравнение теоретического спектра с наблюдаемым для звезды Y CVn.

При рассмотрении рис. 1, где построены потоки $F_{\lambda}/F_{5556\text{А}}$ для одной $T_{eff} = 2500$ К и разных отношений C/O видно, что наиболее чувствительны к изменению C/O пики интенсивностей $\lambda\lambda$ 4740, 5170 и 5640 А. Таким же образом на эти пики влияет изменение содержания азота — интенсивности полос CN изменяются пропорционально содержанию N (рис. 2). Но вклад в изменение спектра в области λ 5170 А за счет азота меньше, чем в λ 5640 А, поскольку в первой области поглощает последовательность $\Delta v = -6$ (полосы 6, 0, λ 5129 А и 7, 1, λ 5240 А), факторы Франка —

Кондона которой в три раза меньше, чем у последовательности с $\Delta v = -5$, доминирующей в области λ 5640 Å (полосы 5, 0, λ 5605 Å и 6, 1, λ 5730 Å). Таким образом, появляется возможность разделить влияние изменения C/O и изменения содержания азота на спектр: области вблизи пиков λ 4740 Å и 5170 Å служат индикатором C/O, а вблизи λ 5640 Å — индикатором изменения содержания азота.

Спектры в синей области ($\lambda < 4700$ Å) хуже описываются нашими теоретическими спектрами, по-видимому, по двум причинам: менее точная фотометрия звезд с низкими T_{eff} из-за слабости потоков в указанной области длин волн и недостаточно хорошее знание источников непрозрачности и поглощающих молекул в данной области.

Вблизи максимума полосы λ 5175 Å, а именно при $\lambda \sim 5180$ Å, заметно поглощение молекулой MgH. Мы попытались описать его, но наши расчеты показали, что последние данные для MgH [3] дают чрезмерно сильные полосы MgH при солнечном содержании Mg. Для описания этой

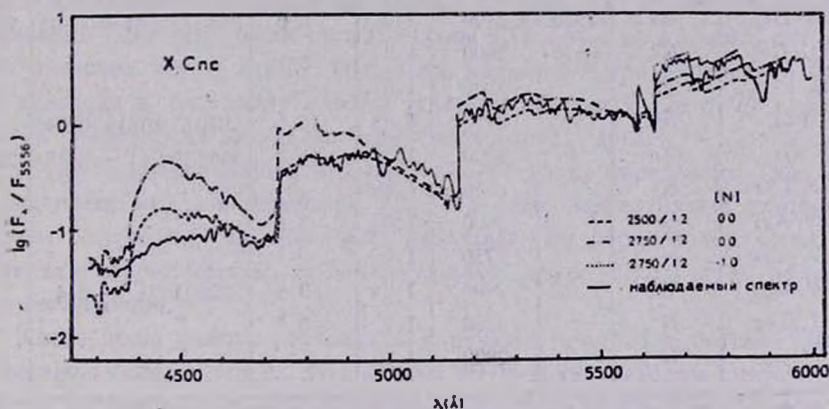


Рис. 3. Сравнение теоретического спектра с наблюдаемым для звезды X Cnc.

полосы требуется допустить дефицит Mg в 10—100 раз для моделей с $T_{eff} = 3000$ K и 100—1000 раз — для моделей с $T_{eff} = 2500$ K. Расчеты в красной области спектра мы ограничили областью $\lambda < 6000$ Å, поскольку в более длинноволновой области спектра необходимо учитывать поглощение CaCl, CaH. Кроме того, там нельзя пренебрегать атомными линиями, поскольку полосы в этой области уже менее интенсивны, чем в видимой части спектра.

Описанную схему подбора параметров мы использовали для сравнения наблюдаемых величин F/F_{5556A} с теоретическими, рассчитанными для $T_{eff} = 2500, 2750, 3000, 3250$ и 3500 K, C/O = 1.0, 1.05, 1.2 и 2.0 и разным содержанием азота (рис. 1). Результаты сравнения приведены в табл. 2 и рис. 2, 3.

Таблица 2

№	Звезда	Спектр	[11] T_e , К	T_{eff} , К (± 200 К)	C/O	[N] (± 0.5)	[19] $T_{eff} / C / O / [N]$	[20] T_{eff}
1	U Cam	N5	2710	2600	1.1	-0.5	2530 (1.3) -0.42	—
2	ST Cam	N5	2750	2600	1.6	-0.5	2800 (1.14) 0.00	—
3	TU Cam	N3	2490	2500	1.4	-0.5	2770 (1.1) 0.08	—
4	BL Ori	N3	2550	2600	1.05	0.0	2960 (1.039) 0.05	3420*
5	RV Aur	N	2640	2750	1.1	-0.5		
6	UU Aur	N3	2380	2600	1.2	-0.5	2825 (1.063) 0.15	2825
7	VW Gem	N3	2880	3000	1.1	-0.5		
8	RV Mon	N	2700	2750	1.1	-0.5		
9	X Cnc	N3	2430	2600	1.1	-0.5	2620 (1.14) -0.56	
10	RT UMa	N5	2900	2750	1.2	0.5		
11	VY UMa	N0	2790	2600	2.0	-0.0	2855 (1.06) -0.31	2855
12	Y CVn	N3	2900	2300	2.1	—	2730 (1.087) -0.12	2730
13	RY Dra	N4	2520	2400	2.2	0.0	2500 (1.18) -0.05	2500
14	DG Cep	N2	2640	2600	1.2	—		
15	RZ Peg	N		2700	1.01	—		
16	Z Psc	N0		2750	1.03	-0.5	2870 (1.014) -0.39	
17	W Ori	N5		2500	1.2	-0.5	2680 (1.16) -0.17	2620*
18	HK Lyr	N		2750	1.02	—		
19	UV Agl	N		3000	1.04	-1.0		
20	VX Cyg	N		2750	1.01	—		
21	RV Cyg	N5		2600	1.04	-0.5	2600 (1.2) -0.4	
22	TT Cyg	N		3250	1.2	-0.5		
23	U Cyg	N		2800	1.02			

* В работе [20] указывается на надежность оценки T_{eff} для этой звезды.

Следует отметить, что наши оценки содержания азота определялись недостаточно уверенно. Может быть, величину D_0 для CN все еще нельзя считать надежной (в последние годы она пересматривалась).

Нельзя также считать точными модели звезд с $T_{eff} = 2500$ К, ввиду недостаточности знания источников непрозрачности при низких температурах. Но, несмотря на недостатки метода, все же можно сделать приближенные оценки T_{eff} и C/O.

4. *Обсуждение.* Рассмотрение результатов табл. 2 позволяет сделать следующие выводы:

1. Не наблюдается корреляции эффективной температуры T_{eff} со спектральными подклассами N; этот факт отмечался также в работе [13].

2. Только холодные N-звезды с $T_{eff} = 2300\text{—}2500$ К имеют отношение $C/O \sim 2.0$. Для большинства звезд $C/O \leq 1.2$.

3. Содержание азота определяется неуверенно из-за отсутствия моделей с величинами отношения C/O между 1.2 и 2.0 и плохого разделения параметров $[N]$ и C/O . Наши оценки содержания $[N]$ лежат в диапазоне от -1.0 до 0.0 , что свидетельствует об отсутствии продуктов CNO-цикла в атмосферах N-звезд. А это говорит о преобладании 3α -процесса.

4. Небольшие изменения эффективной температуры T_{eff} (на $100\text{—}200$ К) значительно влияют на оценку отношения C/O .

Впервые заключение о преобладании 3α -процесса в недрах N-звезд сделал Килстон [10], который исследовал 8 звезд методом синтетического спектра на основе полуэмпирической формулы Миннаэрта. Такой же вывод был сделан для звезды UU Aul в [18]. Результаты более ранних работ [14—17] не были надежными и скорее свидетельствовали о преобладании в атмосферах N-звезд продуктов CNO-цикла. Данные Килстона об отношении C/O [10] были использованы [11] для калибровки спектрофотометрических молекулярных индексов, что позволило определить отношение углерода к кислороду для 61 углеродной звезды. Для 75% исследованных N-звезд оно оказалось в интервале от 1.0 до 2.4.

В нашей работе отношения C/O для 23 звезд определены на основе современных моделей атмосфер [1]. Впервые эффективные температуры N-звезд определены из сравнения наблюдаемого распределения энергии в спектрах с теоретическим, на основе моделей атмосфер с учетом молекулярного поглощения.

Когда наша работа готовилась к печати, появилась статья [19], где определены содержания C, N и O для 30 N-звезд методом синтетического спектра на основе моделей атмосфер. Данные из [19] для общих звезд приведены в предпоследнем столбце табл. 2. В последнем столбце приведены оценки T_{eff} из [20], сделанные методом инфракрасных потоков. Имеющиеся различия в определенных нами оценках C/O и из работы [19], как показали наши расчеты, можно объяснить различием T_{eff} (в работе [19] T_{eff} не определялась). Лишь в двух случаях, а именно для звезд Y CVn и RY Dra, определения отношения C/O значительно различаются. Но только различием эффективных температур для Y CVn нельзя объяснить различие в C/O . В работе [13] указывается на возможность переменности блеска, обусловленной пылевыми оболочками у ряда N-звезд, в том числе у Y CVn и RY Dra.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

Главная астрономическая
обсерватория АН УССР

THE ANALYSES OF MOLECULAR SPECTRUM OF N-TYPE STARS WITH THE MODEL ATMOSPHERES

S. E. NERSISIAN, A. V. SHAVRINA, A. A. YAREMCHUK

The abundances of oxygen, nitrogen and carbon were determined in the atmospheres of 23-N-type stars using the spectrogrammes of 2.6 m telescope of the Byurakan Astrophysical Observatory. The method comparing the theoretical spectra was used. The molecular absorption was taken into account.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. R. Johnson, *Astrophys. J.*, 260, 254, 1982.
2. Л. А. Кузнецова, Н. Е. Кузьменко, Ю. Я. Кузяков, Ю. А. Пластинин, Вероятности оптических переходов двухатомных молекул, Наука, М., 1980, стр. 319.
3. K. Kirby, R. P. Saxon, B. Liu, *Astrophys. J.*, 231, 637, 1979.
4. Н. С. Комаров, В. В. Цымбал, *Астрон. ж.*, 57, 1010, 1980.
5. T. Tsuji, *Astron. and Astrophys.*, 23, 411, 1973.
6. D. L. Lambert, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 249, 1978.
7. T. Kipper, *Tartu publ.*, 41, 278, 1973.
8. J. C. McCallum, W. R. Jarman, R. W. Nichols, *Spectroscopic Rep.*, № 1, 1970, York Univ.
9. K. P. Huber, G. Herzberg, *Molecular Spectra and Molecular Structure. IV. Constants of Diatomic Molecules*, Van Nostrand Reinhold Company, 1979, p. 716.
10. J. Kilston, *Publ. Astron. Soc. Pasif.*, 87, 189, 1975.
11. С. Е. Гов, *Publ. Astron. Soc. Pasif.*, 89, 501, 1977.
12. А. В. Шаврина, *Астрометрия и астрофиз.*, вып. 32, 29, 1977.
13. Р. Х. Оганесян, С. Е. Нерсисян, *Астрофизика*, 23, 245, 1985.
14. R. I. Thompson, H. W. Shnopper, W. K. Rose, *Astrophys. J.*, 163, 533, 1971.
15. R. I. Thompson, *Astrophys. J.*, 212, 754, 1977.
16. M. Querci, F. Querci, *Astron. and Astrophys.*, 9, 1, 1970.
17. F. Querci, M. Querci, T. Tsuji, *Astron. and Astrophys.*, 31, 265, 1974.
18. F. Querci, M. Querci, *Astron. and Astrophys.*, 49, 443, 1976.
19. D. L. Lambert, B. Gustafsson, K. Eriksson, K. H. Hinkle, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 62, 373, 1986.
20. T. Tsuji, *J. Astrophys. Astron.*, 2, 95, 1981.