

УДК 524.316.7.082

Я. В. Павленко, Л. А. Яковина

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27
ур@mao.kiev.ua, yakovina@mao.kiev.ua

Модели атмосфер углеродных гигантов с высоким содержанием углерода

Рассчитано 240 моделей атмосфер углеродных гигантов с высоким содержанием углерода ($2800 T_{эф} 3400 K$, $0.06 \lg(C/O) 2.7$). Данный набор моделей был использован при моделировании распределения энергии в спектре углеродной звезды на поздней стадии эволюции DY Per, которая показывает фотометрические признаки звезд типа R CrB. Большинство моделей металлодефицитные ($-3.5 [Fe/H] < 0$), часть из них рассчитана с дефицитом водорода ($1/9 H/He < 9/1$). Расчеты моделей атмосфер производились с учетом характерных для углеродных звезд источников непрозрачности в рамках классических приближений. Непрозрачность в линиях атомов и молекул рассчитывалась по методике выборочной непрозрачности.

МОДЕЛІ АТМОСФЕР ВУГЛЕЦЕВИХ ГІГАНТІВ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ, Павленко Я. В., Яковина Л. Я. — Розраховано 240 моделей атмосфер вуглецевих гігантів з високим вмістом вуглецю ($2800 T_{эф} 3400 K$, $0.06 \lg(C/O) 2.7$). Даний набір моделей було використано при моделюванні розподілу енергії у спектрі вуглецевої зорі на пізній стадії еволюції DY Per, яка показує фотометричні ознаки зір типу R CrB. Більшість моделей металодіфіцитні ($-3.5 [Fe/H] < 0$), частина з них розрахована з дефіцитом водню ($1/9 H/He < 9/1$). Розрахунки моделей атмосфер виконувались з урахуванням характерних для вуглецевих зір джерел непрозорості в рамках класичних наближень. Непрозорість в лініях атомів та молекул розраховувалась за методикою вибіркової непрозорості.

MODEL ATMOSPHERES OF CARBON GIANTS OF HIGH CARBON ABUNDANCE, by Pavlenko Ya. V., Yakovina L. A. — We calculated 240 model atmospheres for carbon giants of high carbon abundances ($2800 < T_{\text{eff}} < 3400$ K, $0.06 < \log(C/O) < 2.7$). The set of models was used for modelling of spectral energy distribution for the evolved carbon star DY Per showing photometrical features of the R CrB type stars. The majority of the models are metal-deficient ones ($-3.5 < [Fe/H] < 0$), part of them was calculated with hydrogen deficiency ($1/9 < H/He < 9/1$). For the model atmosphere calculations, we used classical approaches with taking into account the relevant opacity sources in carbon stars. The opacity sampling method was applied to calculate the opacity due to atomic and molecular line absorption.

ВВЕДЕНИЕ

Считается установленным, что звезды умеренных масс являются основными поставщиками легких элементов в Галактике после ее формирования на ранних стадиях эволюции Вселенной. Поэтому в современной астрофизике сохраняется устойчивый интерес к определению основных физических характеристик звезд Галактики и ближайших галактик и к анализу химического состава их атмосфер [4, 5]. В процессе эволюции на стадиях после Главной последовательности содержания легких элементов в атмосферах звезд умеренных масс подвергаются значительным изменениям. На стадии post-AGB для атмосфер отдельных звезд умеренных масс характерен не только избыток содержания углерода, но и дефицит водорода. К таким звездам, в частности, относятся звезды типа R CrB. На стадиях эволюции после последней гелиевой вспышки (last helium flash) содержание углерода в атмосфере становится сравнимым с содержанием водорода или даже больше его [6], что наблюдалось в случае объекта Сакураи (V4334 Srg).

Наиболее совершенным методом определения химического состава атмосфер холодных звезд является метод синтетического спектра. Для применения его, однако, необходимо наличие моделей атмосфер исследуемых объектов. Доступные сетки моделей атмосфер углеродных звезд немногочисленны [8, 10, 12]. При этом в расчетах моделей [12] недостаточно полно учитывались источники непрозрачности, характерные для атмосфер углеродных звезд (эти модели атмосфер рассчитаны без учета поглощения HCN и ряда других молекул), мал диапазон варьируемых параметров и большие интервалы их значений. Модели Эриксона и др. [8] более совершенны, но они также были рассчитаны более 20 лет назад, не были опубликованы, так что доступ к ним ограничен. Модели Харрисона и др. [10] рассчитаны для не-большого интервала входных параметров.

Сетки моделей атмосфер красных гигантов для $C/O > 1$ рассчитывались для фиксированных значений основных параметров углерод-

ных звезд: $T_{\text{эф}}$, $\lg g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, C/O . Однако спектры и распределения энергии в спектрах углеродных звезд сильно зависят даже от малых вариаций этих параметров. В случае N—J-звезд, эффективные температуры которых, как правило, близки к 3000 К, рассчитанные спектры подвержены заметным изменениям при изменении C/O на величины порядка 0.001. Потому для конкретных звезд, как правило, необходима интерполяция между сеточными моделями. Далее, значения параметров атмосферы конкретных звезд могут не попадать в пределы сеточных значений. Для исследования таких звезд необходимо рассчитывать новые модели, программы же расчета моделей атмосфер углеродных звезд также немногочисленны.

Недавно нами совместно с А. Ф. Пугачем была выполнена работа по определению параметров атмосферы углеродной звезды типа R CrB DY Per методом синтетического спектра [3]. Параметры звездной атмосферы определялись путем подбора синтетического спектра, который был бы наиболее близок к наблюдаемому в широком интервале длин волн. Поскольку DY Per проявляет эффект R CrB, в ее атмосфере можно было ожидать высокое содержание углерода — более чем на порядок выше солнечного. Такого порядка величины $[\text{C}/\text{Fe}]$ нам удалось получить в предположении значительного дефицита металлов и водорода в атмосфере DY Per. Таким образом, при определении параметров атмосферы DY Per мы вышли за пределы известных и доступных сеток моделей атмосфер углеродных звезд. В рамках итерационного улучшения воспроизведения наблюдаемого распределения энергии в спектре DY Per мы рассчитали набор моделей атмосфер в основном с дефицитом металлов и со значительно более высокими значениями содержаний $[\text{C}/\text{O}]$, чем в сеточных моделях. Из сопоставления с наблюдаемым спектром DY Per было видно, что для значений $\lg(\text{C}/\text{O}) \approx 0.5$ уже необходимо принимать и содержание азота $[\text{N}/\text{Fe}]$ выше солнечного, потому величину $[\text{N}/\text{Fe}]$ мы тоже варьировали. Описать полосы молекулы CN было невозможно без введения дефицита водорода (что позволило получить еще более высокие значения $[\text{C}/\text{Fe}]$), так что отношение H/He также было параметром задачи. Насколько нам известно, модели атмосфер углеродных гигантов с такими высокими значениями содержаний углерода и азота, а также с дефицитом водорода ранее не рассчитывались. Мы считаем, что они могут быть полезны и другим исследователям углеродных звезд для аналогичных задач.

ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР

Модели атмосфер углеродных гигантов мы рассчитывали в классических приближениях по программе SAM12 [1], которая является модификацией программы Куруца ATLAS12 [<http://kurucz.harvard.edu>]. SAM12 предназначена для расчета моделей атмосфер красных гиган-

тов и позволяет рассчитывать модели атмосфер для звезд с заданным (в общем случае не солнечным) химическим составом. К источникам непрерывного поглощения, включенным Куруцом в ATLAS12, добавлено связанно-свободное поглощение атомами C I, N I и O I по данным [2]. Учитывается также CIA (Collisional-Induced Absorption) — поглощение молекулярными комплексами He-H₂ и H₂-H₂, индуцированное столкновениями. Оно становится важным источником непрозрачности в атмосферах холодных звезд с дефицитом металлов [7].

Поглощение в линиях атомов и молекул учитывается в SAM12 по методике выборочной непрозрачности [16]. Компилятивный список линий включает линии атомов из базы данных VALD [13] и молекул CN, C₂, CO, SiH, MgH, NH, OH из базы данных Куруца [14]. В наших расчетах учтено поглощение полосами HCN, линии поглощения HCN взяты из базы данных Харриса и др. [10, 11]. При этом учитывалось поглощение излучения изомерами HCN и NHC.

При расчетах моделей атмосфер C-гигантов принималось значение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 3$, что близко к равновесному значению для CN-цикла. Количественных оценок $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ в атмосфере DY Per никем не делалось, а качественный анализ показывает, что $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} > 20$. Это далеко от значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 3$, но температурная структура моделей атмосфер углеродных гигантов мало чувствительна к этому параметру [1].

Таким образом, каждая модель рассчитывалась для заданного набора параметров $T_{\text{эф}}$, $\lg g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $\lg(\text{C}/\text{O})$. Кроме этого, для большого числа рассчитанных моделей мы задавали также «несолнечные» содержания водорода, гелия и азота, варьируя параметры H/He и $[\text{N}/\text{Fe}]$. Остальные параметры были фиксированными. Мы приняли типичное для углеродных гигантов значение микротурбулентной скорости $V_t = 3$ км/с. Модельные содержания элементов, значения которых не изменялись, мы считали равными солнечными и брали из работы Гуртовенко и Костыка [9]. Содержание углерода определялось заданным отношением C/O и модельным содержанием кислорода.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы рассчитали 240 моделей атмосфер углеродных гигантов в диапазоне эффективных температур $2800 < T_{\text{эф}} < 3400$ К и с содержаниями углерода $0.06 < \lg(\text{C}/\text{O}) < 2.7$. Большинство из рассчитанных моделей металлодефицитные ($-3.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$), 83 модели — с дефицитом водорода ($1/9 < \text{H}/\text{He} < 9/1$). Эти модели и информация о них доступны в интернете по таким адресам:

<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/users/yp/Cmod/cmod.pdf>
<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/users/yp/Cmod/hsol.htm>
 («солнечное» значение H/He),
<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/users/yp/Cmod/hdef.htm>
 (не «солнечные» значения H/He).

Таблица 1. Модели атмосфер, рассчитанные с солнечными содержаниями Н и Не

Номер модели	Имя модели	$T_{\text{эф}}$	$\lg g$	[Fe/H]	$\lg(\text{C/O})$	[N/Fe]
1	2800.00.m00.30a	2800	0.0	0.0	0.3	0.0
2	2800.00.m00.40a	2800	0.0	0.0	0.0	0.0
3	2800.00.m00.50a	2800	0.0	0.0	0.5	0.0
4	2800.00.m20.80a.n130	2800	0.0	-2.0	0.8	1.3
5	2800.00.m25.100a.n130	2800	0.0	-2.5	1.0	1.3
6	2800.00.m25.100a.n150	2800	0.0	-2.5	1.0	1.5
7	2800.00.m30.150a.n150	2800	0.0	-3.0	1.5	1.5
8	2800.00.m30.150a.n170	2800	0.0	-3.0	1.5	1.7
9	2800.00.m30.170a.n130	2800	0.0	-3.0	1.7	1.3
10	2800.00.m30.170a.n160	2800	0.0	-3.0	1.7	1.6

Таблица 2. Модели атмосфер с дефицитом водорода

Номер модели	Имя модели	$T_{\text{эф}}$	$\lg g$	[Fe/H]	H/He	$\lg(\text{C/O})$	[N/Fe]
1	2800.00.m10.hd01.50a	2800	0.0	-1.0	1/9	0.5	0.0
2	2800.00.m10.hd05.50a	2800	0.0	-1.0	5/5	0.5	0.0
3	2800.00.m15.hd01.50a.n20	2800	0.0	-1.5	1/9	0.5	0.2
4	2800.00.m20.hd05.100a.n100	2800	0.0	-2.0	5/5	1.0	1.0
5	2800.00.m20.hd05.100a.n50	2800	0.0	-2.0	5/5	1.0	0.5
6	2800.00.m25.hd05.100a.n150	2800	0.0	-2.5	5/5	1.0	1.5
7	2800.00.m30.hd05.100a.n150	2800	0.0	-3.0	5/5	1.0	1.5
8	2800.00.m30.hd05.100a.n200	2800	0.0	-3.0	5/5	1.0	2.0
9	2800.00.m30.hd05.120a.n170	2800	0.0	-3.0	5/5	1.2	1.7
10	2800.00.m30.hd05.150a.n200	2800	0.0	-3.0	5/5	1.5	2.0

Для примера мы приводим в табл. 1 часть списка моделей атмосфер, рассчитанных с солнечными содержаниями водорода и гелия, а в табл. 2 — часть списка водорододефицитных моделей. Параметры, значения которых не приведены в списках, не варьировались. Принятые для них значения указаны выше.

Форма представления моделей, рассчитанных по программе SAM12, такая же, как моделей Куруца, только для каждого слоя выведена еще дополнительная информация. В качестве примера одна из моделей (до значения $x = 10$) приведена на рис. 1. Параметры $T_{\text{эф}}$, $\lg g$ и [Fe/H] приводятся в строках 1 и 2. В строке 3 содержатся индикаторы учета источников непрозрачности. Строка 4 определяет параметры расчета конвекции и турбулентности в атмосфере. В строке 5 указан коэффициент шкалирования содержаний элементов тяжелее гелия, а также содержания Н и Не (не в логарифмах) в шкале, где сумма содержаний всех химических элементов $N_i = 1$. Строки 6—25 — содержания остальных химических элементов в логарифмах. В строке 26 указано число точек в модели (71) и содержимое колонок модели. Строки 27 и далее — сама модель. В колонках модели содержатся следующие параметры: RNOX — масса вещества над 1 см^2 атмосферы на

```

1. TEF 3000. GRAVITY 0.00000 LTE
2. TITLE (SAM12.7): [Fe/H]=-1.5000
3. OPACITY IFOP 11111111111111111100100001111000000
4. CONVECTION ON 1.60 TURBULENCE OFF 0.00 0.00 0.00 0.00
5. ABUNDANCE SCALE 1.0 ABUNDANCE CHANGE 1 0.50000 2 0.50000
6. ABUNDANCE CHANGE 3 -12.480 4 -12.390 5 -10.940 6 -3.840 7 -5.090
7. ABUNDANCE CHANGE 8 -4.640 9 -8.980 10 -5.450 11 -7.220 12 -5.940
8. ABUNDANCE CHANGE 13 -7.050 14 -5.900 15 -8.090 16 -6.330 17 -8.040
9. ABUNDANCE CHANGE 18 -6.980 19 -8.420 20 -7.160 21 -10.480 22 -8.480
10. ABUNDANCE CHANGE 23 -9.540 24 -7.940 25 -8.140 26 -5.900 27 -8.620
11. ABUNDANCE CHANGE 28 -7.320 29 -9.440 30 -8.940 31 -10.660 32 -10.130
12. ABUNDANCE CHANGE 33 -11.170 34 -10.190 35 -10.910 36 -10.310 37 -10.940
13. ABUNDANCE CHANGE 38 -10.640 39 -11.300 40 -10.980 41 -12.120 42 -11.620
14. ABUNDANCE CHANGE 43 -21.500 44 -11.700 45 -12.420 46 -11.850 47 -12.600
15. ABUNDANCE CHANGE 48 -11.680 49 -11.840 50 -11.540 51 -12.540 52 -11.300
16. ABUNDANCE CHANGE 53 -12.030 54 -11.310 55 -12.420 56 -11.430 57 -12.440
17. ABUNDANCE CHANGE 58 -11.940 59 -12.740 60 -12.140 61 -21.500 62 -12.640
18. ABUNDANCE CHANGE 63 -13.040 64 -12.340 65 -13.640 66 -12.440 67 -13.280
19. ABUNDANCE CHANGE 68 -12.640 69 -13.240 70 -13.340 71 -12.740 72 -12.640
20. ABUNDANCE CHANGE 73 -13.410 74 -12.430 75 -13.270 76 -12.090 77 -12.190
21. ABUNDANCE CHANGE 78 -11.740 79 -12.530 80 -12.450 81 -12.640 82 -11.640
22. ABUNDANCE CHANGE 83 -12.830 84 -21.500 85 -21.500 86 -21.500 87 -21.500
23. ABUNDANCE CHANGE 88 -21.500 89 -21.500 90 -13.300 91 -21.500 92 -14.010
24. ABUNDANCE CHANGE 93 -21.500 94 -21.500 95 -21.500 96 -21.500 97 -21.500
25. ABUNDANCE CHANGE 98 -21.500 99 -21.500
26. READ DBCK6 71 RHGX, T, P, XNE, ABROSS, ACCRAD, VTURB, FLXCNV, VCONV, TauRoss, FluxErr, DeltaT, DeltaRx, FluxRatio: SAM12.7
27. 2.56146846E+00 2225.8 2.557E+00 1.570E+06 3.904E-06 1.562E-03 2.443E+02 0.0E+00 0.0E+00 1.000E-05 1.773E-03 3.477E-04 -2.559E-05 0.00
28. 3.18658780E+00 2247.9 3.182E+00 1.970E+06 4.380E-06 1.625E-03 6.004E+02 0.0E+00 0.0E+00 1.259E-05 1.034E-03 7.894E-04 -2.264E-05 0.00
29. 3.88713014E+00 2270.8 3.881E+00 2.432E+06 4.926E-06 1.654E-03 1.317E+03 0.0E+00 0.0E+00 1.585E-05 2.680E-03 7.264E-04 -5.449E-05 0.00
30. 4.66917270E+00 2295.4 4.662E+00 2.969E+06 5.569E-06 1.667E-03 3.528E+03 0.0E+00 0.0E+00 1.995E-05 3.645E-03 2.550E-04 -8.038E-05 0.00
31. 5.53927739E+00 2321.0 5.530E+00 3.588E+06 6.310E-06 1.657E-03 7.579E+03 0.0E+00 0.0E+00 2.512E-05 3.617E-03 2.231E-04 -2.968E-05 0.00
32. 6.50538420E+00 2346.9 6.495E+00 4.301E+06 7.157E-06 1.620E-03 1.331E+04 0.0E+00 0.0E+00 3.162E-05 3.508E-03 1.794E-04 -4.791E-05 0.00
33. 7.57763727E+00 2372.9 7.565E+00 5.122E+06 8.118E-06 1.557E-03 2.093E+04 0.0E+00 0.0E+00 3.981E-05 3.443E-03 1.701E-04 -3.022E-05 0.00
34. 8.76799659E+00 2398.3 8.754E+00 6.068E+06 9.204E-06 1.474E-03 3.074E+04 0.0E+00 0.0E+00 5.012E-05 3.348E-03 1.501E-04 -3.273E-05 0.00
35. 1.00901294E+01 2423.2 1.007E+01 7.159E+06 1.043E-05 1.380E-03 4.768E+04 0.0E+00 0.0E+00 6.310E-05 3.284E-03 1.355E-04 -9.737E-06 0.00

```

Рис. 1. Пример файла с одной из моделей атмосферы

геометрической глубине z :
$$\rho_x = \int_0^x (\rho) dz \text{ (г/см}^2\text{)},$$
 где $\rho(z)$ — плотность

вещества на глубине z ; T — электронная температура слоя T_e , К; P — газовое давление P_g , дин/см²; XNE — электронная плотность n_e , см⁻³; ABROSS — росселандова непрозрачность τ_{ross} , см²/г; ACCRAD — ускорение a_{rad} , обусловленное лучевым давлением (см/с²); VTURB — турбулентная скорость V_{turb} , км/с; FLXCNV — поток F_{conv} энергии, переносимый конвекцией (эрг см⁻²с⁻¹); VCONV — конвективная скорость v_{conv} , км/с; TauRoss — росселандова оптическая глубина τ_{ross} ; FluxErr — различия F потоков в двух последних итерациях (в процентах от потока в предпоследней итерации); DeltaT — поправка T к температуре после последней итерации; DeltaRx — поправка ρ_x к ρ_x после последней итерации; FluxRatio — отношение F_{conv} / F_{total} конвективного потока к полному потоку энергии.

Показателем качества рассчитанных моделей является их сходимость. Ее можно увидеть в колонке FluxErr (рис. 1), где для каждого слоя приведены различия потоков в двух последних итерациях в процентах от потока в предпоследней итерации. Для большинства представленных в настоящей работе моделей они не превосходят 1 %, что свидетельствует о хорошей сходимости. Иногда мы допускали небольшое превышение над 1 % в самых глубоких слоях модели, и считаем это допустимым, так как эти слои очень мало влияют на рассчитанные спектры звезд.

В табл. 3 мы приводим список моделей, выбранных для иллюстрации влияния различий основных параметров атмосферы ($T_{эф}$, I_{gg} , N/He , $[Fe/H]$, C/O , $[N/Fe]$) на температурные распределения в моделях

Таблица 3. Ряд моделей атмосфер с различными значениями параметров $T_{\text{эф}}$, $\lg g$, H/He , $[\text{Fe}/\text{H}]$, C/O , $[\text{N}/\text{Fe}]$

Номер модели	Имя модели	$T_{\text{эф}}$	$\lg g$	$[\text{Fe}/\text{H}]$	H/He	$\lg(\text{C}/\text{O})$	$[\text{N}/\text{Fe}]$
1	2800.00.m00.50a	2800	0.0	0.0	9/1	0.5	0.0
2	3000.00.m00.20a	3000	0.0	0.0	9/1	0.2	0.0
3	3000.00.m00.50a	3000	0.0	0.0	9/1	0.5	0.0
4	3000.00.m00.hd05.50a	3000	0.0	0.0	5/5	0.5	0.0
5	3000.gp10.m00.20a	3000	+1.0	0.0	9/1	0.2	0.0
6	3000.00.m10.50a	3000	0.0	-1.0	9/1	0.5	0.0
7	3000.00.m10.50a.n30	3000	0.0	-1.0	9/1	0.5	0.3
8	3000.00.m10.100a.n100	3000	0.0	-1.0	9/1	1.0	1.0

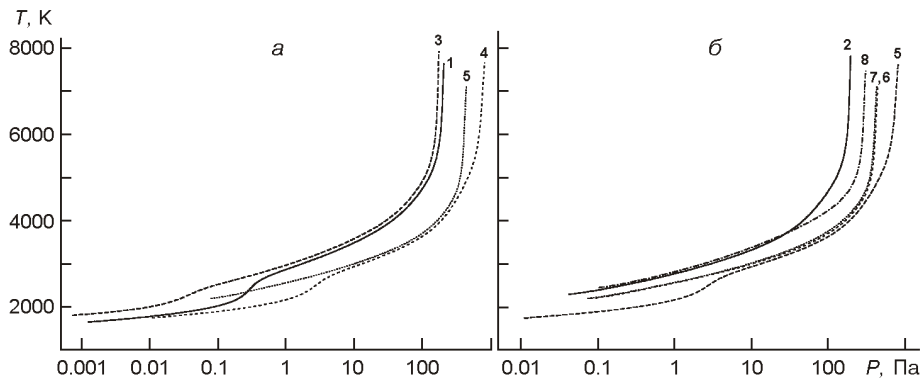


Рис. 2. Модельные распределения температуры с глубиной. Цифры у кривых — номера моделей, указанные в табл. 3

и синтетические спектры углеродных гигантов. Значение $\text{H}/\text{He} = 9/1$ в табл. 3 подразумевает солнечное значение этой величины (по числу атомов). При расчете моделей атмосфер использовались солнечные значения содержаний водорода и гелия с большим количеством знаков: $\lg N(\text{H})=0.90872$, $\lg N(\text{He})=0.08878$. На рис. 2 мы иллюстрируем температурные распределения ($T - P_g$) в моделях атмосфер, приведенных в табл. 3, а на рис. 3 — различия синтетических спектров при изменении $T_{\text{эф}}$, $\lg g$, H/He , $[\text{Fe}/\text{H}]$, C/O и $[\text{N}/\text{Fe}]$.

Синтетические спектры мы рассчитывали по программе WITA6 [15]. Использовалась та же система источников непрозрачности в континууме, что и при расчете моделей атмосфер. Также мы принимали модельные содержания тех химических элементов, содержания которых не задавались во входных данных. Значение микротурбулентной скорости, как и при расчете моделей атмосфер, составляло $V_t = 3$ км/с. Для случая DY Per мы не учитывали изотопный состав углерода, т. е. полагали весь углерод в виде ^{12}C . При формировании компилятивных списков атомных и молекулярных линий были использованы базы данных VALD [13] и Куруца [14] (CD-ROM N18).

Из рис. 2 и 3 видно, что структура моделей 1 и 3 ($T_{\text{эф}} = 2800$ К и 3000 К соответственно) мало изменяется в глубоких слоях атмосферы

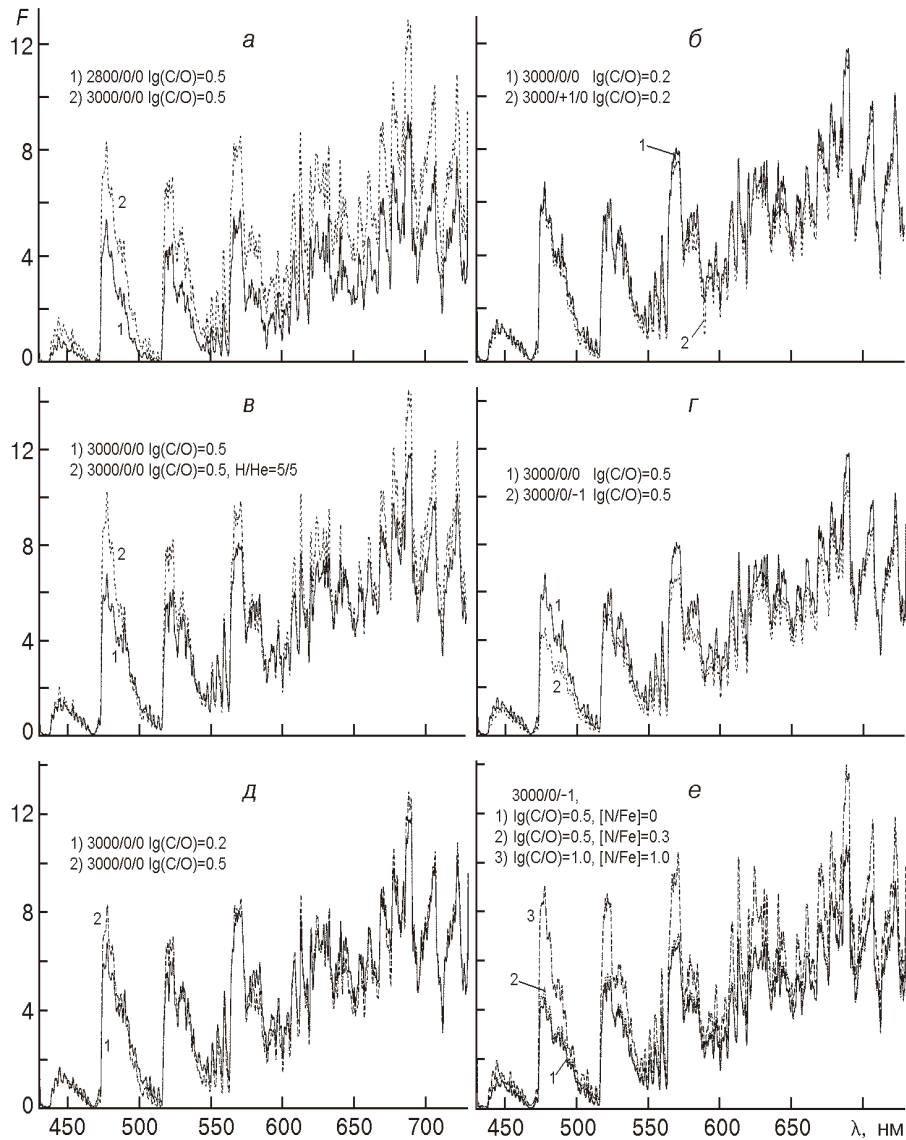


Рис. 3. Зависимость оптических спектров углеродных гигантов от изменений параметров $T_{\text{эф}}$ (а), $\lg g$ (б), H/He (в), металличности (г), содержания углерода и азота (д, е)

и значительно — в поверхностных слоях (рис. 2, а). Чувствительность же синтетических спектров к $T_{\text{эф}}$ велика (рис. 3, а). Изменения параметра $\lg g$ очень сильно влияют на структуру модели атмосферы (рис. 2, б, модели 2 и 5), но синтетические спектры при этом изменяются очень мало (рис. 3, б).

Модели 3 и 4 различаются содержаниями водорода и гелия. В модели 3 отношение H/He идентично солнечному (9/1), а в модели 4 — H/He = 5/5. Как видно из рис. 2, а, модель атмосферы с дефицитом водорода глубже и значительно холоднее, чем при солнечном значении отношения H/He. Различия синтетических спектров даже при умерен-

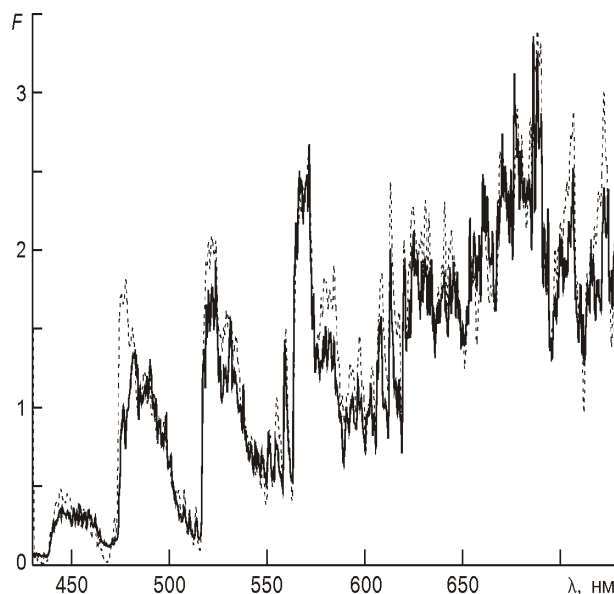


Рис. 4. Описание наблюдаемого распределения энергии в спектре DY Per теоретическим для модели атмосферы 3000/0/-1.5, H/He = 5/5, lg(C/O) = 0.8, [N/Fe] = 0.5

ном дефиците водорода H/He = 5/5 значительные — потоки в водорододефицитной модели существенно выше.

Модели 3 и 6 отличаются металличностью. Видно, что металлодефицитные модели глубже и холоднее, чем модели с нормальной металличностью, по всей глубине атмосферы (рис. 2, а). Потоки же в металлодефицитных моделях ниже. На рис. 3, з показаны различия в синтетических спектров для двух моделей с $T_{\text{эф}} = 3000$ К и значениями $[\text{Fe}/\text{H}] = 0, -1$.

Чувствительность синтетических спектров к содержанию азота низка. При изменении $[\text{N}/\text{Fe}]$ на 0.3 и модели атмосферы (рис. 2, б, модели 6 и 7), и синтетические спектры (рис. 3, е) изменяются мало.

На рис. 3, д, е мы показываем чувствительность синтетических спектров к изменению содержания углерода и к совместному изменению содержаний углерода и азота (при высоких содержаниях С не может не возрасти и содержание N). Изменения структуры моделей атмосферы для моделей 6, 7 и 8 видны на рис. 2, б. Поскольку, как сказано выше, чувствительность синтетических спектров к содержанию азота низкая, при изменении содержаний и С, и N эффект обусловлен в основном содержанием С. Видно (рис. 3, е), что влияние параметра C/O на синтетические спектры углеродных звезд может быть очень велико.

На рис. 4 мы сравниваем наблюдаемый спектр DY Per с синтетическим спектром, рассчитанным с моделью атмосферы из нашего набора $T_{\text{эф}}/\text{lg}g/[\text{Fe}/\text{H}] = 3000/0/0$, H/He = 5/5, lg(C/O) = 0.8, $[\text{N}/\text{Fe}] = 0.5$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

По всей видимости, физические условия и строение атмосфер С-гигантов невозможно идеально описать в рамках классических приближений. Причиной этого является ряд факторов, которые пока невозможно учесть в полной мере. Основные из них — постоянное истечение вещества и наличие пыли во внешних частях богатых углеродом звезд; динамичная во времени неоднородность атмосфер, обусловленная природой процессов переноса энергии; большая протяженность атмосфер, вследствие чего необходимо учитывать эффекты сферичности; отклонения от условий ЛТР и др. Однако представляется несомненным, что на сегодняшний день даже упрощенные модели, представленные нами выше, позволяют производить качественный и количественный анализ атмосфер углеродных звезд.

Удовлетворительность описания нашими моделями реальных атмосфер углеродных гигантов можно оценить только по описанию звездного спектра синтетическим. Пример такого описания мы приводим на рис. 4. Мы считаем, что с нашей моделью атмосферы распределение энергии в спектре DY Per описывается удовлетворительно, так как мы описали потоки и в красной, и в синей областях спектра, а также градиент распределения энергии. Вероятно, неудовлетворительное описание отдельных участков объясняется недостаточной полнотой и неточностью списков молекулярных линий, а также недостаточно полным учетом вкладчиков в поглощение в синей области спектра.

С практической точки зрения наш набор моделей представляется полезным при решении по меньшей мере трех задач:

— эти модели атмосфер могут быть использованы для оценки влияния отдельных параметров атмосферы на теоретические спектры и других звезд, сходных по характеристикам с DY Per;

— рассчитанные нами модели атмосфер красных гигантов могут использоваться как начальные приближения для расчета более точных моделей атмосфер других звезд, учитывающих особенности химического состава этих звезд;

— наши модели могут представить методический интерес для сопоставления с моделями, рассчитанными иначе — с другой входной информацией, с использованием других методов, с учетом отклонений от ЛТР и пр.

Авторы благодарят А. Ф. Пугача за предоставленный наблюдаемый спектр DY Per.

1. Павленко Я. В. Модели атмосфер красных гигантов // *Астрон. журн.*—2003.—**80**.—С. 67—74.
2. Павленко Я. В., Жуковская С. В. Свободно-связанное поглощение атомов С I, N I, O I в атмосферах звезд поздних спектральных классов // *Кинематика и физика небес. тел.*—2003.—**19**, № 1.—С. 28—35.

3. Яковина Л. А., Пугач А. Ф., Павленко Я. В. DY Per — самая холодная углеродная звезда типа R CrB с дефицитом металлов // *Астрон. журн.*—2009.—**86**.—С. 32—49.
4. Abia C. Spectroscopy of carbon stars in the Draco and Ursa Minor dwarf spheroidal galaxies // *Astron. J.*—2008.—**136**.—P. 250—258.
5. Abia C., de Laverny P., Wahlin R. Chemical analysis of carbon stars in the Local Group. II. The Carina dwarf spheroidal galaxy // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**481**.—P. 161—168.
6. Asplund M., Gustafsson B., Kameswara R. N., Lambert D. L. Abundance similarities between the RCrB star V854 Cen and the born-again Sakurai's object // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**332**.—P. 651—660.
7. Borysow A., Jorgensen U. G., Zheng C. Model atmospheres of cool, low-metallicity stars: the importance of collision-induced absorption // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**324**.—P. 185—195.
8. Eriksson K., Gustafsson B., et al. Effects of HCN molecules in carbon star atmospheres // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**132**.—P. 37—44.
9. Gurtovenko E. A., Kostik R. I. The system of solar oscillator strengths. — Kyiv: Main Astronomical Observatory, 1998.—63 p.—(Preprint / MAO-98-3E).
10. Harris G. J., Pavlenko Ya. V., Jones H. R. A., Tennyson J. The identification of HCN and HNC in carbon stars: model atmospheres, synthetic spectra and fits to observations in the 2.7—4.0 μ m region // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**344**.—P. 1107—1118.
11. Harris G. J., Tennyson J., Kaminsky B. M., et al. Improved HCN/NHC line list, model atmosphere, and sythetic spectra for WZ Cas // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**367**.—P. 400—406.
12. Johnson H. R. Red giant model atmospheres. III. Carbon-enriched models // *Astrophys. J.*—1982.—**260**.—P. 254—271.
13. Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., et al. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—**138**.—P. 119—133.
14. Kurucz R. L. Data Bank.—1993—1994.—CD-ROM N 1—22.
15. Pavlenko Ya. V. Analysis of the spectra of two Pleiades brown dwarfs: Teide 1 and Calar 3 // *Astrophys. and Space Sci.*—1997.—**253**.—P. 43—53.
16. Sneden C., Johnson H. R., Krupp B. M. A statistical method for treating molecular line opacities // *Astrophys. J.*—1976.—**204**.—P. 281—289.

Поступила в редакцию 10.11.08