

УДК 524.316.7.082

Г. А. Полиновский¹, Л. А. Яковина¹, Я. В. Павленко^{1,2}

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
greg@mao.kiev.ua, yakovina@mao.kiev.ua

²Center for Astrophysics Research, University of Hertfordshire,
College Lane, Hatfield, Hertfordshire AL10 9AB, UK
yp@mao.kiev.ua

Анализ распределения энергии в спектре пекулярного углеродного гиганта TU Gem

Звезда TU Gem давно известна как пекулярный углеродный гигант гало Галактики, однако до сих пор дискутируется принадлежность ее к типу CN-звезд. В настоящей работе мы сделали возможные оценки параметров атмосферы TU Gem путем моделирования и сравнения с наблюдениями спектра звезды в двух широких спектральных диапазонах — 400–720 нм и 900–2440 нм. Для анализа использовались низкодисперсионный оптический спектр TU Gem Барнбаум и др. (1996) ($R \sim 600$) и инфракрасный спектр Танаки и др. (2007) ($R \sim 2600$). Модели атмосферы рассчитывались по программе SAM12 (Павленко, 2003). Ввиду неоднозначности оценки металличности ($[Fe/H]$) по нашему спектральному материалу, достаточно уверенно определена только эффективная температура TU Gem, которая слабо зависит от металличности — $T_{\text{эф}} = 3000 \pm 100$ К. Значения C/O, $[C/Fe]$ и $[N/Fe]$ мы определили для диапазона $2.0 > [Fe/H] > 0.0$ с шагом $[Fe/H] = 0.5$. Наша оценка $[C/Fe] = 0.63 \pm 0.67$ при значении $[Fe/H] = 1.0$ выше, чем оценка $[C/Fe] = 0.21$ при $[Fe/H] = 1.1$ в работе Киппера и др. (1996), а оценки содержания $[N/Fe] = +1.0$ при указанных металличностях совпадают. Это приближает TU Gem к CN-звездам, однако для уверенного вывода необходим детальный анализ химического состава атмосферы TU Gem.

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ У СПЕКТРІ ПЕКУЛЯРНОГО ВУГЛЕЦЕВОГО ГІГАНТА TU Gem, Поліновський Г. О., Яковина Л. А., Павленко Я. В. — Зоря TU Gem давно відома як пекулярний вуглецевий гігант гало Галактики, але досі дискутується належність її до типу

CH-зір. У цій роботі ми зробили можливі оцінки параметрів атмосфери TU Gem шляхом моделювання та порівняння із спостереженнями спектру зорі у двох широких спектральних діапазонах — 400 — 720 нм та 900 — 2440 нм. Для аналізу використовувались низькодисперсійний оптичний спектр TU Gem Барнбаум та ін. (1996) ($R \sim 600$) та інфрачервоний спектр Танаки та ін. (2007) ($R \sim 2600$). Моделі атмосфери розраховувались за програмою SAM12 (Павленко, 2003). Через неоднозначність оцінки металічності ($[Fe/H]$) за нашим спектральним матеріалом достатньо упевнено визначена тільки ефективна температура TU Gem, яка слабо залежить від металічності — $T_{ef} = 3000 \pm 100$ К. Значення C/O, $[C/Fe]$ та $[N/Fe]$ ми визначили для діапазону $-2.0 \leq [Fe/H] \leq 0.0$ з кроком $[Fe/H] = 0.5$. Наша оцінка $[C/Fe] = 0.63 - 0.67$ при значенні $[Fe/H] = -1.0$ вища, ніж оцінка $[C/Fe] = 0.21$ при $[Fe/H] = -1.1$ у роботі Кінпера та ін. (1996), а оцінки вмістів $[N/Fe] = +1.0$ при вказаних металічностях збігаються. Це наближує TU Gem до CH-зір, але для упевненого висновку необхідний детальний аналіз хімічного складу атмосфери TU Gem.

AN ANALYSIS OF THE SPECTRAL ENERGY DISTRIBUTION OF THE PECULIAR CARBON-RICH GIANT TU GEM, by Polinovskyi G. O., Yakovina L. A., Pavlenko Ya. V. — TU Gem has been known as a peculiar carbon giant of galactic halo, but its belonging to the type of CH stars is still debated. We estimated the TU Gem atmospheric parameters through the simulation of the star's spectrum and comparison of the simulation result with observations for two broad spectral ranges, namely, 400—720 nm and 900 — 2440 nm. For the analysis we used the low-dispersion optical spectrum of TU Gem by Barnbaum et al. (1996) ($R \sim 600$) and the infrared spectrum by Tanaka et al. (2007) ($R \sim 2600$). The atmospheric models were calculated by the program SAM12 (Pavlenko, 2003). Because of the estimate ambiguity for metallicity ($[Fe/H]$) from our spectral data, only effective temperature of TU Gem, which weakly depends on the metallicity, is determined with confidence, namely, $T_{ef} = 3000 \pm 100$ K. The values of C/O, $[C/Fe]$ and $[N/Fe]$ were estimated for the ranges of $-2.0 \leq [Fe/H] \leq 0.0$ with the step $[Fe/H] = 0.5$. Our evaluation $[C/Fe] = 0.63 - 0.67$ at the value $[Fe/H] = -1$ is higher than the estimate $[C/Fe] = 0.21$ at $[Fe/H] = -1.1$ by Kipper et al. (1996), and the abundance evaluations $[N/Fe] = +1.0$ at called metallicities coincide. This brings TU Gem closer to CH stars, but for more accurate conclusions a detailed analysis of the chemical composition of the TU Gem atmosphere is required.

ВВЕДЕНИЕ

Звезда TU Gem впервые была занесена в каталог холодных углеродных звезд [26] в 1957 г. и давно известна как пекулярный углеродный гигант гало Галактики. Большая часть этих звезд (как в шаровых скоп-

лениях, так и звезд поля) — это СН-звезды. Рядом исследователей TU Gem была классифицирована как возможная СН-звезда.

Аномалии химического состава СН-звезд состоят в общем дефиците металлов, высоких содержаниях углерода и азота относительно железа ($[C/Fe]$, $[N/Fe] \approx 1$) и характерных содержаниях (относительно Fe) элементов s-процесса. Во-первых, они повышены ($[s/Fe] = 1 \dots 2$). Во-вторых, содержания тяжелых элементов s-процесса (Ba — Sm) могут на порядок и больше превосходить содержания легких элементов (Sr, Y, Zr) [3]. Для отношения изотопов углерода $^{12}C/^{13}C$ в атмосферах СН-звезд характерны или очень высокие, или очень низкие значения. Остальные характеристики атмосфер СН-звезд (эффективные температуры $T_{эф}$, ускорения свободного падения на поверхности lgg и микротурбулентные скорости V_t) у СН-звезд такие же, как у углеродных звезд классов R и N. СН-звезды классов R1—R8 часто называют «теплыми»; среди известных СН-звезд их большинство. СН-звезды классов R9—N называют «холодными», и к ним может принадлежать TU Gem. Возможные эволюционные сценарии образования наблюдающихся в СН-звездах аномалий химического состава изложены во многих работах, например [20, 39, 45, 46]. По заключению Киппера и др. [21] более теплые СН-звезды, вероятно, эволюционно отличаются от холодных СН-звезд тем, что первые все являются двойными системами и похожи на бариевые звезды, происхождение которых хорошо объясняется сценарием переноса масс в двойной системе, а в холодных СН-звездах указанные выше аномалии могут быть результатом собственной эволюции звезды. Также по результатам серии работ [2, 19—21] Киппером и др. [21] сделан вывод, что холодные СН-звезды разделяются на две группы. Одна из них является низкотемпературным продолжением СН-звезд ранних типов. Ко второй группе принадлежат холодные СН-звезды с очень большим дефицитом металлов, до $[Fe/H] = -3$ [20], и очень высокими отношениями $^{12}C/^{13}C$ (90, >100). Ни для одной из холодных СН-звезд с большим дефицитом металлов не установлена двойственность.

TU Gem впервые была классифицирована как СН-звезда Ямаши-той [47] на основании повышенной интенсивности линий H и Ba II. В пользу такой классификации свидетельствует также полученное Эглитисом [4] высокое значение спектрального индекса СН. В работе [43] TU Gem причислена к СН-звездам по значениям ИК-показателей цвета $J-H$ и $H-K$: СН-звезды более «голубые» по сравнению с «нормальными» С-звездами. По данным о химическом составе TU Gem из работ [21] и [24] можно сказать, что TU Gem могла бы быть холодной СН-звездой первой группы, но содержания углерода и элементов s-процесса не достигают уровня СН-звезд. Отметим, что у холодного гиганта TU Gem есть спутник — белый карлик. Эта двойная система занесена в каталог двойных звезд «Tycho 2» (TDSC 14074 [14]), но не очевидно, что компоненты этой системы образуют физическую пару. В работе Ричичи и Чандрасекара [35], наверное, наиболее реалистично определена ситуация со статусом TU Gem: эта звезда на пределе

классификации с точки зрения цвета, потери массы и принадлежности к сферической составляющей звездного населения Галактики. Возможно, это относится и к ее химическому составу.

Для уточнения эволюционного статуса TU Gem необходимо продолжать комплексное исследование этой звезды. В настоящей работе для определения параметров атмосферы TU Gem используется метод синтетического спектра, основанный на использовании современных моделей атмосфер углеродных звезд. Кроме расчета спектра для оптического диапазона, моделируется распределение энергии в ближнем ИК-диапазоне спектра TU Gem ($\lambda = 900...2440$ нм). Используемый нами метод принципиально отличается от всех других тем, что основан не на использовании небольших участков спектра, свободных от молекулярного поглощения, а на извлечении информации из всего звездного спектра в возможно более широком диапазоне.

ДАННЫЕ О TU GEM ИЗ РАБОТ ДРУГИХ АВТОРОВ

Звезда TU Gem довольно яркая и исследовалась неоднократно. В табл. 1 приведены данные об общих характеристиках TU Gem. Обычно ее относят к звездам гало, однако отметим очень небольшое значение ее галактической широты $b = 3.4$. Видно также, что у TU Gem достаточно большая собственная скорость, что характерно для СН-звезд.

Основные результаты определения $T_{\text{эф}}$ и других параметров атмосферы TU Gem со ссылками на источники мы приводим в табл. 2. В третьей графе используются следующие обозначения: R, IR, NIR — красный, ИК-, ближний ИК-диапазоны соответственно; SpI — спектральные индексы; bb — чернотельная аппроксимация; CI — показатели цвета; IRFM — метод ИК-потоков [42]; F_{bol} — болометрические потоки; Ang. diam — определение $T_{\text{эф}}$ по угловому диаметру звезды; SED — распределение энергии в спектре. В четвертой графе приведены значения металличности [M/H]. Как видно, для TU Gem было сделано много оценок эффективной температуры разными методами.

Таблица 1. Общие данные о TU Gem

Характеристика	Значения	Литературный источник
Галактические координаты	$l = 185.3^\circ, b = +3.4^\circ$	[http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad]
Радиальная скорость V_{rad} , км/с	29.5	[48]
	32.9 — 42.0	[6]
Расстояние D , кпк	0.33—1.2	[35]
Блеск V	7.36^m	[http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad]
Болометр. зв. величина M_{bol}	-5.4^m	[32, 43]
	-4.66^m	[9]
Спектральный класс	C6.4	[38]
Переменность: тип, период	SRb, $P = 230^d$	[43]
Амплитуда колебаний блеска	3.1^m	[28]

Таблица 2. Параметры атмосферы TU Gem по данным разных литературных источников

N	$T_{эф}$, К	Метод определения $T_{эф}$	[M/H]	C/O	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	[C/Fe]	[N/Fe]	V , км/с	Литературный источник
1	2680	SpI (R), bb		1.29					[16]
2	2600	SpI (IR), bb							[8]
3	2600	SpI (opt.), bb		1.4					[4]
4	2770	CI (IR)	-0.5	1.12	59	0.02	0.58	2.2	[24]
5	3078	CI+IRFM			26				[27]
6	2800	CI (IR)	-1.10	1.11	10, 26 (IR)	0.21	1.02	2.0	[21]
7	2950	IRFM							
8	2715	CI+F _{bol}							[10]
9	3162	Ang. diam.							[35]
10	3000	SED in NIR							[40]

Определения $T_{эф}$ и других параметров атмосферы до 1980 г. были основаны на использовании фотометрических показателей цвета и/или спектральных индексов. В работе Гоу [16] для 75 холодных углеродных звезд, в число которых вошла TU Gem, были определены цветовые температуры по температурным индексам. По той же методике Эглитис [4] измерил спектральные индексы в диапазоне = 322.5...770 нм и определил по ним цветовые температуры и отношения C/O для 89 углеродных звезд.

В фундаментальной работе Ламберта и др. [24], посвященной определению содержаний C, N, O и ряда других параметров атмосферы 30 углеродных звезд галактического диска на основе моделей атмосфер, звезда TU Gem не выделена как звезда гало. В работе были использованы фурье-спектры в области 4000...6600 см^{-1} (2.5...1.5 мкм) с разрешением 0.07 см^{-1} (~ 4 км/с). Эффективная температура TU Gem была определена по калибровочным зависимостям для ИК-показателей цвета. Металличность в рассчитанных авторами моделях атмосфер была принята нормальной ([M/H] = 0.0). Отметим, что при этом значения [Fe/H] определить не удалось, а по нескольким линиям Na и Ca были получены только оценки [Na/H] = -0.2 и [Ca/H] = -0.5. Это говорит о небольшом дефиците металлов в атмосфере TU Gem. В предположении [Fe/H] = -0.5 величины [C/Fe] и [N/Fe] также не достигают значений, характерных для CH-звезд.

В работе Охнаки и Цудзи [27], посвященной определению изотопного отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ в атмосферах 62 N-звезд и 15 SC-звезд, эффективные температуры примерно половины звезд были определены методом IRFM. Для остальных звезд (включая TU Gem) использовались калибровочные зависимости, полученные по взятым из литературных источников ИК-показателям цвета и значениям $T_{эф}$, полученным методом IRFM.

Киппер и др. в работе [21] представляют анализ химического состава пяти металлодефицитных углеродных звезд гало Галактики. Для

TU Gem были использованы спектры высокого разрешения в области $\lambda = 508...785$ нм из работы [5]. В этой работе методом IRFM была получена оценка $T_{\text{эф}} = 2950$ К. Поскольку она значительно выше, чем все полученные до 1996 г. оценки, авторы предпочли ей согласующееся со многими другими значение $T_{\text{эф}} = 2800$ К, полученное ими по ИК-показателям цвета.

Получены содержания большого числа химических элементов относительно Fe, металличности исследуемых звезд [Fe/H], отношения C/O, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ и [hs/ls] (отношения средних содержаний тяжелых элементов s-процесса к средним содержаниям легких s-элементов относительно солнечного hs/ls). По параметру [hs/ls] Киппер и др. [21] исключили TU Gem из числа CH-звезд.

Оценки эффективных температур углеродных звезд в обширном каталоге Бергота и др. [10] основаны на данных многоцветной фотометрии, взятых из разных каталогов. Подход к определению температуры состоял в том, что по большому числу показателей цвета (до 14) для каждой звезды было восстановлено распределение энергии практически во всем спектральном диапазоне, и по нему рассчитан интегральный (болومترический) поток излучения. Также показатели цвета характеризовали форму распределения энергии. При использовании двух таких характеристик оценки эффективной температуры минимально зависят от химического состава атмосферы звезды.

В работе Ричичи и Чандрасекара [35] эффективная температура TU Gem определена по угловому диаметру звезды, измеренному во время покрытия ее Луной. Получено значение $T_{\text{эф}} = 3160 \pm 110$ К. Прямой метод определения $T_{\text{эф}}$ в принципе является самым точным, и полученные им оценки считаются самыми надежными. Во время наблюдения покрытия TU Gem находилась вблизи максимума блеска, и в работе [35] убедительно показано, что в это время эффективная температура TU Gem была существенно выше 2800 К. Вместе с тем авторы допускают, что для TU Gem диапазон $T_{\text{эф}} = 2800...3200$ К реален из-за пульсаций звезды.

Танака и др. [40] определили эффективные температуры 29 углеродных звезд путем моделирования избранных областей их спектров в ближнем ИК-диапазоне (0.9 — 2.4 мкм). Отмечена высокая чувствительность спектров углеродных звезд к эффективной температуре в указанном диапазоне. Моделировались области длин волн 1.35, 1.74 и 2.29 мкм, где минимален вклад в поглощение молекул C_2 , CN и CO. Полученная оценка $T_{\text{эф}} = 3000$ К близка к оценкам методом IRFM [21, 27].

Из табл. 2 видно, что оценки $T_{\text{эф}}$ для TU Gem в разных работах существенно различаются. Характерно, что значения $T_{\text{эф}}$, полученные по фотометрическим данным, как правило, ниже оценок, полученных путем моделирования разных участков спектра на основе моделей атмосфер и оценки по угловому диаметру звезды. Оценка параметра $\lg g = -0.6$ для TU Gem была получена в работе [21] из стандартного соот-

ношения между $T_{эф}$, массой, светимостью и l_{gg} . Микротурбулентная скорость в работах [21, 24] определялась по стандартной методике.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

В данной работе мы использовали два наблюдательных спектра звезды TU Gem. Спектр в оптическом диапазоне ($\lambda = 400...720$ нм) с разрешением $R \approx 600$ получен в работе [7]. Он не откалиброван по потокам, и следовательно, не является распределением энергии в указанном диапазоне. Второй спектр, являющийся распределением энергии в ближнем ИК-диапазоне ($\lambda = 910...2440$ нм) с разрешением $R \approx 2600$, был любезно предоставлен нам Танакой (подробно описан в работе [40]).

Мы провели корректировку этих спектров за межзвездное поглощение с использованием процедуры «Deredden Spectrum» модуля «spectool» из пакета IRAF*. Процедура основана на данных из работы [12], где приведены кривые межзвездного покраснения для оптического и ИК-диапазонов. При этом необходимо знать расстояние до объекта, неопределенность которого для TU Gem очень велика (см. табл. 1). Ввиду этого мы приняли для параметра межзвездной экстинкции его максимальное значение $A_V = 1.84$, исходя из данных работы [37]. В этой работе приведено распределение пыли в Галактике по данным, полученным с помощью аппаратуры IRAS/ISSA и COBE/DIRBE, и оценено межзвездное поглощение по разным направлениям на основе стандартного закона экстинкции. Результаты [37] оформлены в виде калькулятора межзвездного покраснения DUST, который доступен по адресу <http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>. С помощью данного веб-сервиса можно получить величины $E(B - V)$ или A_V в направлении на объект по его галактическим координатам. Отметим, что в работе [36] недавно было уточнено значение A_V в направлении TU Gem, которое равно $A_V = 1.58$.

На рис. 1 приведены теоретические теллурические спектры, рассчитанные нами с помощью программы LBLRTM [13] в рамках модели стандартной ночной атмосферы MIPAS (<http://www-atm.physics.ox.ac.uk/RFM/atm/>). Как видно, в оптическом диапазоне теллурического поглощения практически нет. Заметная атмосферная деталь видна только в области $685 - 695$ нм. В ближнем же ИК-диапазоне в области $900 - 2500$ нм теллурический спектр довольно сильный. Он особенно искажает звездный спектр в областях: $915 - 985$, $1080 - 1230$, $1295 - 1525$, $1730 - 2080$, $2270 - 2500$ нм. В настоящей работе использованы спектры, исправленные в работах [7] и [40] за атмосферное поглощение с использованием звезд-стандартов, однако, как

* IRAF (Image Reduction and Analysis Facility). Он распространяется National Optical Astronomy Observatory, которая находится под руководством Ассоциации Университетов по Исследованиям в области Астрономии (AURA), согласно соглашению о сотрудничестве с Национальным научным фондом (National Science Foundation)

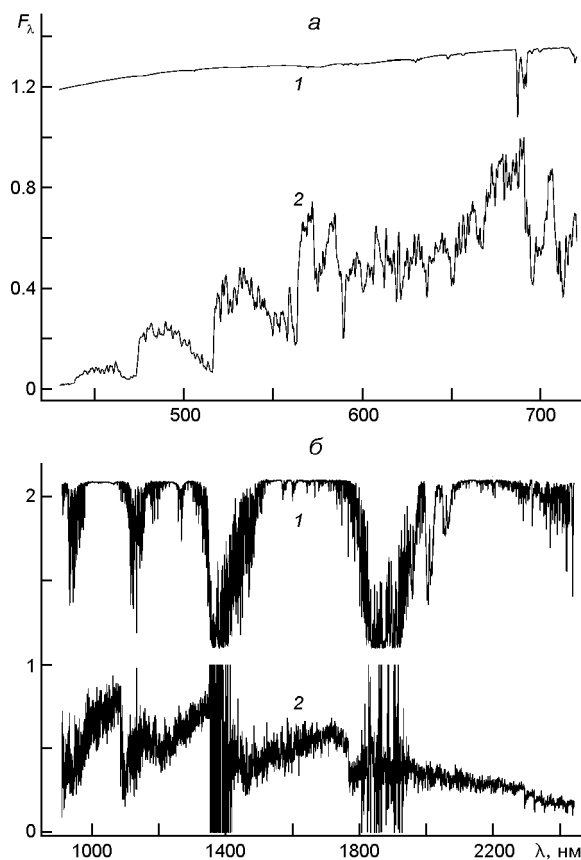


Рис. 1. Теоретический теллурический спектр (кривые 1) и спектр TU Gem (кривые 2) в используемых диапазонах

видно из рис. 1, ИК-спектр TU Gem остался сильно искаженным в областях 1295 — 1525 и 1730 — 2080 нм.

РАСЧЕТ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ И СИНТЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Модели атмосферы TU Gem рассчитывались по программе Я. В. Павленко SAM12, описанной, например, в работах [29, 30]. Она предназначена для расчета моделей атмосфер красных гигантов в классических приближениях и позволяет рассчитывать модели атмосфер для звезд с заданным химическим составом. Для углеродных звезд учитываются специфические источники непрозрачности в их атмосферах. Возможен учет изотопного состава углерода.

Мы рассчитали 4-мерную сетку моделей атмосферы TU Gem, где варьировались параметры $T_{эф}$, $[Fe/H]$, C/O и $[N/Fe]$. Диапазоны их изменения были выбраны на основании данных табл. 2: $T_{эф} = 2600...3400$ К (шаг 100 К), $3.0 [Fe/H] 0.0$ (шаг 0.5 dex), $1.005 C/O 2.0$ (шаг переменный, $C/O = 0.005...0.4$), $0.0 [N/Fe] 1.5$ (шаг 0.5 dex).

Таблица 3. Системы двухатомных молекул, линии которых учитывались при расчете распределений энергии

Молекула	Переход	Система	D_0 , эВ
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	$d^3_g - a^3_u$	Свана	6.297 [44]
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	$A^1_u - X^1_g$	Филлипса	6.297 [44]
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	$b^3_g - a^3_u$	Баллик — Рамзея	6.297 [44]
$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$	$B^2 - X^2$	Фиолетовая	7.75 [25]
$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$	$A^2_i - X^2$	Красная	7.75 [25]
$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$	$X^1 - X^1$		11.108 [41]
^{12}CN	$A^2 - X^2_r$		3.47 [41]
^{12}CN	$B^2 - X^2_r$		3.47 [41]
^{12}CN	$C^2 - X^2_r$		3.47 [41]
^{16}OH	$X^2_i - X^2_i$		4.381 [41]
^{24}MgH	$A^2_r - X^2$		1.27 [11]

Мы приняли $[\text{O}/\text{Fe}] = 0.3$ (типичное значение для углеродных гигантов гало [21]), изотопное отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 26$ и микротурбулентную скорость $V_t = 2$ км, как в [21]. Для всех остальных элементов, кроме С, N, O, содержания относительно Fe полагались солнечными из работы [1]. Значение lgg мы также не варьировали и приняли типичное для углеродных гигантов значение $\text{lgg} = 0.0$.

Далее для полученной сетки моделей атмосферы нами была рассчитана сетка синтетических спектров для областей 400...720 нм и 900...2440 нм. Для расчета теоретических распределений энергии использовались список атомных линий и списки вращательных линий молекулярных систем, указанных в табл. 3. Список атомных линий был взят из базы данных VALD [22], а списки молекулярных линий — из баз данных Куруца [23] (CD-ROM № 18) и Йоргенсена [<http://www.astro.ku.dk/uffegi/>], SCAN database <ftp://stella.nbi.dk>]. Для системы X-X молекулы CO также использовался список Гурвица [15]. На сайте Йоргенсена список линий красной системы CN — это известный список SCAN-CN [18], а списки линий молекулы C_2 взяты из работ Керси [33, 34]. Они были приведены Йоргенсеном к стандартному виду, и их силы осцилляторов обновляются по мере поступления новых молекулярных данных.

Компилятивный список молекулярных линий, составленный из списков Йоргенсена (Jorgensen), Керси (Querci), Куруца (Kurucz) и Гурвица (Goorvitch) мы будем далее называть JQKG, а список, включающий только молекулярные списки линий Куруца с CD-ROM № 18 — K18.

Для сравнения с наблюдениями синтетические спектры сворачивались с гауссианой, которая использовалась для моделирования влияния инструментального уширения и макротурбулентности [17]:

$$F^x - F^y - G(x - y)dy, \quad (1)$$

где F^y и $G(x - y)$ — рассчитанные потоки и профиль уширения соответственно.

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ СПЕКТРА УГЛЕРОДНОГО ГИГАНТА В ОПТИЧЕСКОМ И БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНАХ

На рис. 2 представлены теоретические спектры основных вкладчиков в поглощение в области $\lambda = 450...740$ нм спектра углеродной звезды с $T_{\text{эф}} = 3100$ К. Использовались списки молекулярных линий Куруца с CD-ROM № 18. Видно, что почти во всем оптическом диапазоне расположены сильные полосы системы Свана молекулы C_2 . Также в оптическом диапазоне, особенно в синей области, значителен вклад атомного поглощения, однако из-за сильного молекулярного поглощения в низкодисперсионном спектре выделяется только резонансный дублет Na I ($\lambda = 589.0, 589.6$ нм). Вклад линий CN проявляется в основном на фиолетовом и красном концах спектра. Мы проверили, что гидриды CH, NH, OH, MgH, SiH, по данным Куруца [23], не дают существенного вклада в поглощение в оптическом диапазоне.

На рис. 2 мы приводим теоретические спектры основных вкладчиков в поглощения в используемой нами ближней ИК-области спектра. Использовались также списки молекулярных линий Куруца с CD-ROM № 18. Видно, что основной вклад в области $\lambda = 900...2440$ нм дают красная система CN, системы Филлипса и Баллик-Рамзея молекулы C_2 и система CO X-X. Мы проверили, что вклад гидридов CH и NH незначителен, но небольшой вклад дает система X-X молекулы OH. Также мал вклад атомного поглощения. Сильные полосы разных молекулярных систем накладываются друг на друга, и мало участков, где доминирует поглощение одной молекулой. Однако такие участки имеются. Это области сильных полос красной системы CN с $v = 0, 1$ ($\lambda = 910...1000, 1080...1520$ нм), полос системы Баллик — Рамзея с $v = 0$ ($\lambda = 1760...1800$ нм) и первого обертона системы X-X молекулы CO ($v = 2, \lambda = 2290...2440$ нм).

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

Для выбора лучшего варианта синтетического спектра мы вначале использовали алгоритм, описанный в работе [31]. Он предусматривает поиск минимума трехмерной функции:

$$S(f_s, f_h, f_g) = (F_{\text{obs}} - F^x)^2, \quad (2)$$

где f_s, f_h, f_g — сдвиг по длинам волн между наблюдаемым и теоретическим спектрами, коэффициент нормирования наблюдаемого спектра и

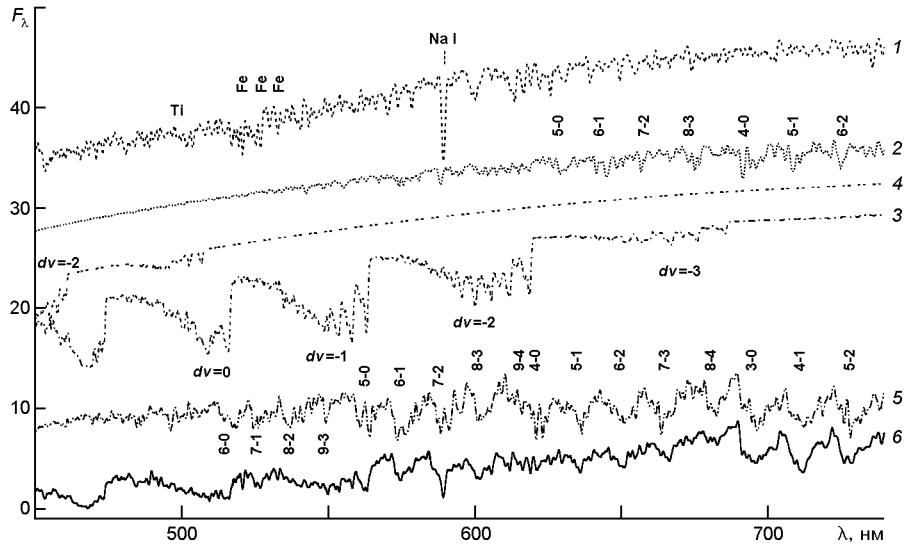


Рис. 2. Теоретические спектры основных вкладчиков в поглощение в атмосфере углеродного гиганта в области $\lambda = 450 \dots 750$ нм. Модель атмосферы $T_{\text{эф}}/\lg g/[\text{Fe}/\text{H}] = 3100/0/0.0$, $\text{C}/\text{O} = 1.05$, $[\text{N}/\text{Fe}] = 0.0$: 1 — атомный спектр, 2—5 — спектры молекулярных систем $\text{C}_2 A-X$, $\text{C}_2 d-a$, $\text{CN } B-X$ и $\text{CN } A-X$, 6 — синтетический спектр (атомы + молекулы)

параметр уширения профиля, соответственно. Параметры f_s , f_h , f_g определяются процедурой минимизации для каждого синтетического спектра. Результатом является трехмерная поверхность, по координатам которой отложены искомые параметры и значение S -функции. Положение минимума такой поверхности дает наилучшие по этому алгоритму значения параметров синтетического спектра. Для уменьшения количества свободных параметров задачи сдвиги по длинам волн f_s и параметры уширения профиля f_g мы подбирали для используемых наблюдаемых спектров заранее. Для свертки синтетических спектров с инструментальным профилем (см. формулу (1)) и получения параметра S (близости наблюдаемого и сглаженного теоретического спектров) мы использовали программу Я. В. Павленко FITO [31]. Мы допускаем, что точность полученных таким образом значений параметров атмосферы может быть недостаточна, но с помощью этой методики можно быстро локализовать область поиска более точных значений.

Из-за наличия в ИК-спектре [40] участков, где исключался теллурический спектр и где качество звездного спектра осталось неудовлетворительным, мы определяли суммарное расхождение между наблюдаемым и теоретическим спектрами согласно формуле (2) не для всей области $\lambda = 910 \dots 2440$ нм, а для четырех участков, относительно свободных от теллурического поглощения ($\lambda = 989 \dots 1075$, $1178 \dots 1298$, $1528 \dots 1724$ и $2082 \dots 2341$ нм). Это позволило уменьшить S -величины и лучше локализовать минимум S -функции.

Параметры атмосферы звезды, определенные путем минимизации S -функции, мы затем проверяли и уточняли, анализируя визуально

жем определить по этой области только эффективную температуру TU Gem. Поэтому для всех значений металличности в избранном диапазоне [Fe/H] мы определили $T_{\text{эф}}$, используя C/O и [N/Fe], полученные по оптическому диапазону. При подборе эффективной температуры мы добивались описания синтетическим спектром прежде всего скачков потоков перед головами сильных молекулярных полос, а также описания коротковолнового и длинноволнового концов наблюдаемого спектра.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы рассчитали значения S -функции и провели минимизацию только для ИК-спектра Танаки и др. [40], так как использовавшийся нами спектр Барнбаум и др. [7] для оптического диапазона не является распределением энергии.

Для оценки чувствительности результатов к возможной неточности учета межзвездного поглощения мы произвели расчеты для двух вариантов редуцированного спектра TU Gem, отличающихся величиной параметра A_V : максимально возможного значения $A_V = 1.84$, предполагающего поглощение до края Галактики, и $A_V = 1.00$. Значение $A_V = 1.00$ выбрано нами произвольно для рассмотрения случая, когда TU Gem находится между нами и внешней границей Галактики.

Для сравнения с наблюдениями использовались синтетические спектры, рассчитанные со списком молекулярных линий K18. Содержание азота [N/Fe] мы не определяли и положили его солнечным, так как синтетические спектры в диапазоне $\lambda = 900...2440$ нм очень мало чувствительны к этому параметру.

В табл. 4 приведены лучшие значения оценок параметров атмосферы согласно минимальным значениям S -функций для двух вариантов коррекции наблюдаемого спектра TU Gem за межзвездное поглощение. Видно, что для спектра, редуцированного со значением экстинкции $A_V = 1.00$, минимальные значения S -функций при одинаковых металличностях меньше, чем при коррекции с $A_V = 1.84$, т. е. син-

Таблица 4. Значения параметров атмосферы для ИК-диапазона (спектр Танаки и др. [40]), полученные методом минимизации S -функции при значении [N/Fe] = 0.0

№	$A_V = 1.84$				$A_V = 1.00$			
	[Fe/H]	$T_{\text{эф}}, \text{K}$	lg(C/O)	S	[Fe/H]	$T_{\text{эф}}, \text{K}$	lg(C/O)	S
1	0.0	3200	0.02	9.43	0.0	3000	0.01	6.68
2	-0.5	3300	0.08	9.54	-0.5	3100	0.02	6.86
3	-1.0	3300	0.12	10.4	-1.0	3200	0.08	7.75
4	-1.5	3300	0.3	12.1	-1.5	3200	0.12	8.66
5	-2.0	3300	0.2	16.7	-2.0	3200	0.3	9.46
6	-2.5	3300	0.3	18.7	-2.5	2800	0.12	8.87
7	-3.0	2800	0.3	17.7	-3.0	2900	0.3	9.74

тетические спектры при $A_V = 1.00$ ближе к наблюдаемому спектру TU Gem. Вероятно, это объясняется завышенным значением $A_V = 1.84$ для звезды TU Gem, и требуется уточнение этого параметра с учетом более точных значений расстояния до звезды.

Далее мы уточняли значения параметров атмосферы TU Gem путем визуального выбора лучших вариантов синтетического спектра. Для спектра TU Gem, редуцированного со значением $A_V = 1.84$, все оценки параметров атмосферы мы сделали для двух вариантов списков молекулярных линий — JQKG и K18. Для $A_V = 1.00$ были сделаны выборочные оценки. На рис. 4 мы приводим описания синтетическими спектрами спектра Барнбаум и др. [7] при значениях металличности

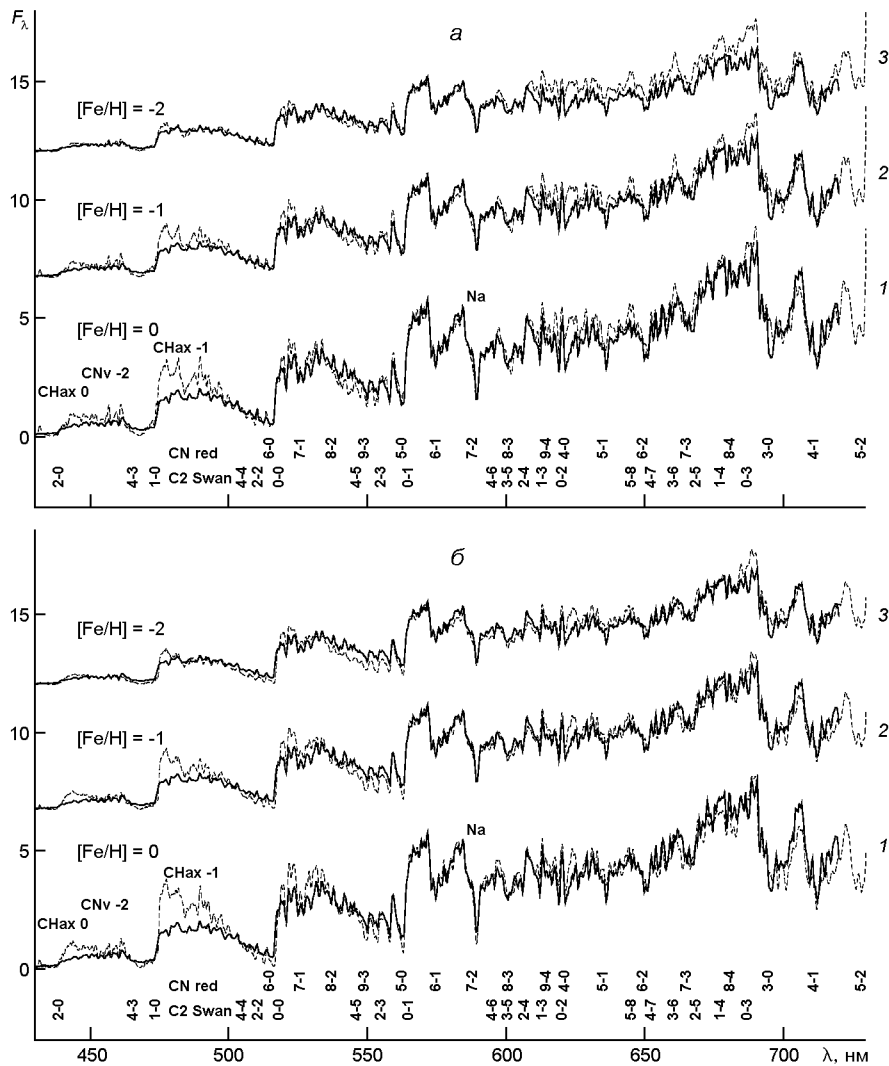


Рис. 4. Описания синтетическими спектрами спектра [7] при значениях металличности $[Fe/H] = 0.0, 1.0$ и 2.0 : *a* — при использовании списка молекулярных линий JQKG (1 — модель 3100/0/0.0, C/O=1.10, $[N/Fe] = 0.0$, 2 — 3000/0/-1.0, C/O=1.32, $[N/Fe] = +1.0$, 3 — 2900/0/-2.0, C/O =2.00, $[N/Fe] = +1.5$), *б* — при использовании списка K18 (1 — модель 3100/0/0.0, C/O =1.05, $[N/Fe] = 0.0$, 2 — 3000/0/-1.0, C/O =1.20, $[N/Fe] = +1.5$, 3 — 2900/0/-2.0, C/O =2.00, $[N/Fe] = +1.5$)

Таблица 5. Параметры атмосферы TU Gem для металличностей 2.0 [Fe/H] 0.0 при $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 26$. Наблюдаемый спектр редуцирован с $A_v = 1.84$

Модель			Оптический диапазон					ИК
№	[Fe/H]	Mol.list	$T_{\text{эф}}$, К	C/O	[C/Fe]	[N/Fe]	[C/N]	$T_{\text{эф}}$, К
1	0.0	JQKG	3100	1.10	0.59	0.0	0.59	3000
2		K18	3100	1.05	0.57	0.5	0.07	3100
3	-0.5	JQKG	3000	1.20	0.63	0.5	0.13	3000
4		K18	3000	1.10	0.59	1.0	-0.41	3000
5	-1.0	JQKG	3000	1.32	0.67	1.0	-0.33	2900
6		K18	3000	1.20	0.63	1.0	-0.37	3100
7	-1.5	JQKG	3000	1.58	0.75	1.0	-0.25	3000
8		K18	2900	1.32	0.67	1.5	-0.83	3000
9	-2.0	JQKG	2900	2.00	0.85	1.5	-0.65	2900
10		K18	2900	2.00	0.85	1.5	-0.65	2900

ности [Fe/H] = 0.0, -1.0 и -2.0. На рис. 4, а приведены синтетические спектры, рассчитанные со списком молекулярных линий JQKG, а на рис. 4, б — рассчитанные со списком K18.

Видно, что список молекулярных линий JQKG несколько лучше описывает структуру спектра TU Gem, а список K18 лучше описывает его форму. Видно также, что описание наблюдаемого спектра TU Gem синтетическим спектром в оптическом диапазоне в целом улучшается с понижением металличности. По области 450...620 нм мы можем сделать вывод, что металличность TU Gem [Fe/H] < 1.0, однако описание красного конца спектра TU Gem ухудшается с понижением [Fe/H]. Поскольку спектр [7] не нормирован в потоках и, как уже отмечалось, не является распределением энергии, мы не можем уверенно выбрать лучшее значение металличности. Оценки $T_{\text{эф}}$ и содержаний C и N для значений 2.0 [Fe/H] 0.0 мы приводим в табл. 5.

На рис. 5 мы приводим описания синтетическими спектрами ИК-спектра Танаки и др. [40] при тех же значениях металличности [Fe/H] = 0.0, 1.0 и 2.0 и для тех же списков линий. Можно сказать, что описание области = 900...2440 нм ухудшается с увеличением дефицита металлов из-за увеличения расхождения между наблюдаемым и теоретическими спектрами в диапазоне 1600...2000 нм. Этот вывод добавляет неопределенности в вопрос о металличности TU Gem. Поэтому мы оставляем его открытым. Оценки $T_{\text{эф}}$ по ИК-области для диапазона 0.0 [Fe/H] 2.0 мы приводим также в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что погрешность определения $T_{\text{эф}}$ TU Gem по обеим спектральным областям составляет 100 К. Погрешность определения C/O в лучшем случае составляла 0.1, а [N/Fe] — не выше 0.5 dex. Оценки содержаний углерода и азота несколько отличаются для списков молекулярных линий JQKG и K18. Последний дает более низкие содержания углерода и более высокие содержания азота, чем список JQKG. Однако эти различия не превосходят погрешности определения этих параметров.

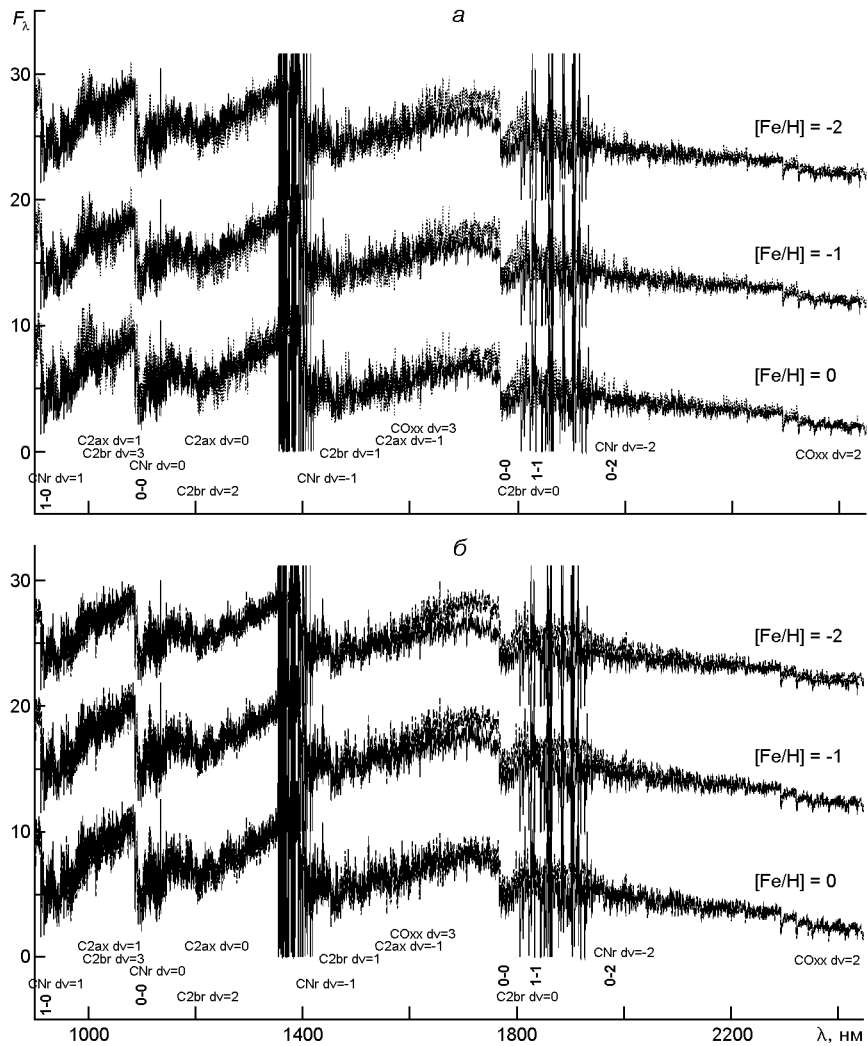


Рис. 5. Описания синтетическими спектрами спектра [40] при значениях металличности $[Fe/H] = 0.0, 1.0$ и 2.0 при использовании: *a* — списка молекулярных линий JQKG (*1* — модель $3000/0/0.0$, $C/O = 1.10$, $[N/Fe] = 0.0$, *2* — $2900/0/-1.0$, $C/O = 1.32$, $[N/Fe] = +1.0$, *3* — $2900/0/-2.0$, $C/O = 2.00$, $[N/Fe] = +1.5$), *б* — списка K18 (*1* — модель $3100/0/0.0$, $C/O = 1.05$, $[N/Fe] = 0.5$, *2* — $3100/0/-1.0$, $C/O = 1.20$, $[N/Fe] = +1.0$, *3* — $2900/0/-2.0$, $C/O = 2.00$, $[N/Fe] = +1.5$). Обозначения молекулярных систем: C_{2ax} — C_2 A-X, C_{2br} — C_2 B-A, CNr — CN A-X, COxx — CO X-X

Получив значения $T_{эф}$, мы смогли рассчитать значения lgg для TU Gem по стандартному соотношению между lgg , массой M , $T_{эф}$ и болометрической звездной величиной звезды M_{bol} . При $M = 1.0$, $T_{эф} = 2900...3100$ К и $M_{bol} = 4.66^m$ [9] диапазон значений lgg составил $0.4... 0.5$. Чтобы оценить влияние такого изменения lgg на наши результаты, мы для значения $[Fe/H] = 1.0$ определили параметры атмосферы TU Gem при $lgg = 0.5$. Это привело к понижению $T_{эф}$ не более чем на 100 К. Изменения содержаний углерода и азота также не пре-

высили точности наших оценок. Являются ли для TU Gem рассчитанные значения l_{gg} более точными, чем принятое нами $l_{gg} = 0.0$, сказать сложно, так как масса TU Gem не определялась, а оценки светимости зависят от достаточно неопределенной величины расстояния до звезды.

Мы проверили зависимость результатов от параметра $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, сделав оценки для полученного в работе Киппера и др. [21] значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 10$ (см. табл. 2). Такое значение ближе к характерным $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ для СН-звезд с умеренным дефицитом металлов. Изменения значений параметров атмосферы не превысили погрешность определения наших оценок, а описания наблюдаемого спектра TU Gem синтетическими спектрами несколько лучше при $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 26$, чем при $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 10$.

Использование для оценки параметров атмосферы TU Gem наблюдаемых спектров Барнбаум и др. [7] и Танаки и др. [40], редуцированных за межзвездное поглощение со значением $A_V = 1.00$, понизило только некоторые наши оценки $T_{\text{эф}}$ TU Gem по ИК-диапазону. Однако это понижение $T_{\text{эф}}$ не превысило 100 К. Отметим также, что расхождение между наблюдаемым и синтетическими спектрами в области

1600...2000 нм, возрастающее с понижением металличности (см. рис. 5), при $A_V = 1.00$ меньше, чем при $A_V = 1.84$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настоящая работа показала возможность определения эффективной температуры углеродного гиганта по распределению энергии в оптическом и ближнем ИК-диапазонах его спектра методом математического моделирования. Оценки содержания углерода и азота зависят от металличности звезды, которую мы не смогли локализовать из-за разных выводов о лучшем значении $[\text{Fe}/\text{H}]$ по разным областям спектра TU Gem. Основным достоинством использованного нами метода является надежность оценки $T_{\text{эф}}$ при использовании широкого спектрального диапазона. Основным недостатком этого метода — зависимость результатов от полноты и точности списков молекулярных линий. Отметим также высокие требования к точности наблюдаемых распределений энергии, важным моментом редукции которых является процедура учета межзвездного поглощения.

Из наших результатов можно сделать следующие выводы.

1. Полученное нами значение эффективной температуры TU Gem $T_{\text{эф}} = 3000 \pm 100$ К несколько ниже, чем оценка Ричичи и Чандрасекара [35] $T_{\text{эф}} = 3162$ К, полученная самым точным методом — по угловому диаметру TU Gem. Однако в работе [35] отмечено, что в силу переменности звезды значение $T_{\text{эф}}$ может колебаться от $T_{\text{эф}} = 2800$ К до 3162 К. Наш результат хорошо согласуется с оценками Охнаки и Цудзи [27] и Киппера и др. [21], полученными методом IRFM (3078 и 2950 К соответственно), и с оценкой Танаки и др. [40] (3000 К).

2. Наша оценка $T_{\text{эф}}$ не выходит за пределы 3000–100 К при понижении $\lg g$ на 0.5 dex; при изменениях металличности в диапазоне $-2.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.0$; при допущении, что $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 10$; при использовании двух независимых списков молекулярных линий (JQKG и K18) и при изменении параметра межзвездного поглощения почти в два раза ($A_V = 1.84$ и 1.00).

3. Наша оценка $[\text{C}/\text{Fe}] = 0.63 \dots 0.67$ при значении $[\text{Fe}/\text{H}] = -1$ выше, чем оценка $[\text{C}/\text{Fe}] = 0.21$ при $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.1$ в работе Киппера и др. [21], а наша оценка содержания $[\text{N}/\text{Fe}] = +1.0$ совпадает с результатом [21].

4. Полученные нами результаты приближают TU Gem к типу СН-звезд.

5. Для более полной и точной оценки химического состава атмосферы TU Gem и уверенного вывода об эволюционном статусе этой звезды необходимо анализировать спектры более высокого разрешения.

Расчеты моделей атмосфер выполнялись на кластере Центра астрофизических исследований Университета Гердфордшир, Я. В. Павленко благодарит сотрудников Центра за содействие в проведении расчетов. Мы благодарим создателей международных баз данных, которые использовались при выполнении работы: VSNET, Kyoto University (Япония), AAVSO (США), SIMBAD (Франция, Страсбург), VALD (Австрия, Вена). Благодарим также Р. Куруца и У. Йоргенсена за возможность доступа к их базам данных на сайтах <http://cfaku5.harvard.edu> и <http://stella.nbi.dk>. Я. В. Павленко и Л. А. Яковина выполняли работу при поддержке гранта FP7 POSTAGBin GALAXIES (N 269193), International Research Staff Exchange Scheme.

1. Гуртовенко Е. А., Костик Р. І. Система сонычных сил осциляторів. — Київ, 1998.—63 с.—(Препринт / НАН України, Головна астрономічна обсерваторія; № МАО-98-3Е).
2. Киппер Т. А., Киппер М. А. Химический состав углеродной звезды гало V Aгі // Письма в астроном. журн.—1990.—16, № 12.—С. 1113—1117.
3. Любимков Л. С. Химический состав звезд: метод и результаты анализа. — Одесса: НПФ Астропринт, 1995.—323 с.
4. Эглитис И. Спектрофотометрические исследования углеродных звезд // Науч. инфор.—1989.—67.—С. 54—62.
5. Barnbaum C. A high-resolution spectral atlas of carbon stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1994.—90, N 1.—P. 317—432.
6. Barnbaum C., Hinkle K. H. Infrared and optical velocities of carbon stars // *Astron. J.*—1995.—110.—P. 805—822.
7. Barnbaum C., Stone R. P. S., Keenan P. C. A moderate-resolution spectral atlas of carbon stars: R, J, N, CH, and Barium stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1996.—105.—P. 419—473; FTP data on-line: <http://archive.is/tFI87>.
8. Baumert J. H. Eight-color photometry of carbon stars: Dr. Phil. diss. — Ohio State Univ., 1972.—265 p.
9. Bergeat J., Chevallier L. The mass loss of C-rich giants // *Astron. and Astrophys.*—2005.—429.—P. 235—246.
10. Bergeat J., Knapic A., Rutily B. The effective temperatures of carbon-rich stars // *Astron. and Astrophys.*—2001.—369.—P. 178—209.

11. *Bernath P. F., Black J. H., Brault J. W.* The spectrum of magnesium hydride // *Astrophys. J.*—1985.—**298**.—P. 375—381.
12. *Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S.* The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // *Astrophys. J.*—1989.—**345**.—P. 245—256.
13. *Clough S. A., Shephard M. W., Mlawer E. J., et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes, Short Communication // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*—2005.—**91**.—P. 233—244.
14. *Fabircius C., Hog E., Makarov V. V., et al.* The Tycho double star catalogue // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**384**.—P. 180—189.
15. *Goorvitch D.* Infrared CO line for the X1Sigma(+) state // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1994.—**95**.—P. 535—552.
16. *Gow C. E.* Spectrophotometry of cool carbon stars // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1977.—**89**.—P. 510—518.
17. *Gray D. F.* The observation and analysis of stellar photospheres. — New York: Cambridge Univ. Press, 2005.—496 p.
18. *Jorgensen U. G., Larsson M.* Molecular opacities of astrophysical interest—The A2Pi—X2Sigma(+) system of CN // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**238**.—P. 424—434.
19. *Kipper T.* Chemical composition of a halo carbon star TT CVn // *Balt. Astron.*—1992.—**1**.—P. 181—189.
20. *Kipper T., Jorgensen U. G.* Chemical composition of the metal-poor carbon star HD 187216 // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**290**.—P. 148—158.
21. *Kipper T., Jorgensen U. G., Klochkova V. G., Panchuk V. E.* Chemical composition of metal-poor carbon stars in the halo // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**306**.—P. 489—500.
22. *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.
23. *Kurucz R. L.* CD-ROM NN 1 23. — Cambridge, MA: Smithsonian. *Astrophys. Obs.*, 1993. <http://cfaku5.harvard.edu/molecules/H2O>—1999.
24. *Lambert D. L., Gustafsson B., Eriksson K., Hinkle K. H.* The chemical composition of carbon stars. I - Carbon, nitrogen, and oxygen in 30 cool carbon stars in the Galactic disk // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1986.—**62**.—P. 373—425.
25. *Lambert D. L.* Stellar photospheres and molecules — a view from the bridge // *Molecules in the Stellar Environment / Ed. U. G. Jorgensen.* — Berlin, Springer-Verlag, 1993.—P. 1—28.
26. *Nassau J. J., Blanco V. M.* Carbon stars in Two Northern Milky way zones // *Astrophys. J.*—1957.—**125**.—P. 195—209.
27. *Ohnaka K., Tsuji T.* Quantitative analysis of carbon isotopic ratios in carbon stars. I. 62 N-type and 15 Sc-type carbon stars // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**310**.—P. 933—951.
28. *Olofsson H., Eriksson K., Gustafsson B., Carlstrom U.* A study of circumstellar envelopes around bright carbon stars. I. Structure, kinematics and mass-loss rate // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1993.—**87**, N 12.—P. 267—304.
29. *Pavlenko Ya. V.* Model atmospheres of red giants // *Astron. Rep.*—2003.—**47**, N 1.—P. 59—67.
30. *Pavlenko Ya. V., Yakovina L. A.* Model atmospheres of carbon giants with high carbon abundance // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2009.—**25**.—P. 302—308.
31. *Pavlenko Ya. V., Jones H. R. A.* Carbon monoxide bands in M dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**396**.—P. 967—975.
32. *Peery Jr. B. F.* Distances and luminosities of irregular variables of type N // *Astrophys. J.*—1975.—**199**.—P. 135—144.

33. *Querci F., Querci M., Kunde V. G.* Opacity probability distribution functions for electronic systems of CN, C2 molecules including their stellar isotopic forms // *Astron. and Astrophys.*—1971.—**15**.—P. 256—274.
34. *Querci F., Querci M., Tsuji T.* Model atmospheres for C type stars // *Astron. and Astrophys.*—1974.—**31**.—P. 265—282.
35. *Richichi A., Chandrasekhar T.* Near-infrared observations of the carbon stars TU Geminorum and SS Virginis at milliarcsecond resolution // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**451**.—P. 1041—1044.
36. *Schlafly E. F., Finkbeiner D. P.* Measuring reddening with Sloan Digital Sky Survey stellar spectra and recalibrating SFD // *Astrophys. J.*—2011.—**737**, N 2.—103.
37. *Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M.* Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds // *Astrophys. J.*—1998.—**500**.—P. 525—553.
38. *Shenavrin V. I., Taranova O. G., Nadzhip A. E.* Search for and study of hot circumstellar dust envelopes // *Astron. Rep.*—2011.—**55**.—P. 31—81.
39. *Smith G. H.* The chemical inhomogeneity of globular clusters // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1987.—**99**.—P. 67—90.
40. *Tanaka M., Letip A., Nishimaki Y., et al.* Near-infrared spectra of 29 carbon stars: simple estimates of effective temperature // *Publs Astron. Soc. Jap.*—2007.—**59**.—P. 939—953.
41. *Tsuji T.* Molecular abundances in stellar atmospheres. II // *Astron. and Astrophys.*—1973.—**23**.—P. 411—431.
42. *Tsuji T.* Intrinsic properties of carbon stars. I. Effective temperature scale of N-type carbon stars // *J. Astrophys. and Astron.*—1981.—**2**, N 2.—P. 95—113.
43. *Ulla A., Thejll P., Kipper T., Jorgensen U. G.* Infrared observations of peculiar carbon stars // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**319**.—P. 244—249.
44. *Urdahl R. S., Bao Y., Jackson W. M.* Laboratory studies of photodissociation processes relevant to the formation of cometary radicals // *Chem. Phys. Lett.*—1991.—**178**.—P. 425—429.
45. *Vanture A. D.* The CH stars. II. Carbon, nitrogen and oxygen abundances // *Astron. J.*—1992.—**104**, N 5.—P. 1986—1996.
46. *Vanture A. D.* The CH stars. III. Heavy element abundances // *Astron. J.*—1992.—**104**.—P. 1997—2004.
47. *Yamashita Y.* A study of carbon star spectra based on the C-classification // *Publ. Dao.*—1967.—**13**.—P. 67—101.
48. *Yuasa M., Unno W.* Distance determination of mass-losing stars // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1999.—**51**.—P. 197—209.

Статья поступила в редакцию 25.11.13