

УДК 524.316.7.082

Л. А. Яковина¹, Я. В. Павленко¹, К. Абиа², А. Э. Розенбуш¹

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

²Departament de Física Teòrica y del Cosmos, Universidad de Granada
18071 Granada, Spain
cabia@ugr.es

Об оценках содержания лития в атмосферах углеродных звезд, полученных с помощью современных списков линий

С помощью синтетических спектров в области 668...674 нм определены содержания лития в атмосферах трех углеродных звезд по резонансному дублету $Li\ I\ 670.8$ нм при использовании модифицированного списка атомных линий из базы данных VALD и трех вариантов списков линий молекул CN и C_2 , являющихся модификациями списков с сайта Йоргенсена (<http://stella.nbi.dk>) и из банка данных Куруца (1993, CD-ROM NN 1–23). Указанные списки линий тестировались по спектрам Солнца, Арктира и ранней R-звезды HD 100764. Были проанализированы бленды, включающие дублет $Li\ I\ 670.8$ нм, в спектрах N-звезд AW Cyg и UX Dra. Получены оценки $\lg N(Li) = 2, 1.4$ и 0.9 для HD100764, AW Cyg и UX Dra соответственно. Различия оценок содержания лития $\lg N(Li)$ для использованных списков молекулярных линий не превосходят 0.2 dex.

ПРО ОЦІНКИ ВМІСТУ ЛІТІЮ В АТМОСФЕРАХ ВУГЛЕЦЕВИХ ЗІР, ОТРИМАНІ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ СПИСКІВ ЛІНІЙ, ЯКОВИНА Л. Я., ПАВЛЕНКО Я. В., АБІА К., РОЗЕНБУШ О. Е. — За допомогою синтетичних спектрів у області 668...674 нм визначено вміст літію в атмосферах трьох вуглецевих зір за резонансним дублетом $Li\ I\ 670.8$ нм при використанні модифікованого списку атомних ліній з бази даних VALD та трьох варіантів списків ліній молекул CN та C_2 , що є модифікаціями списків з сайту Йоргенсена (<http://stella.nbi.dk>) та з банку даних Куруца (1993, CD-ROM NN 1–23). Вказані списки ліній тестувались за спектрами Сонця, Арктира та ранньої R-зорі

HD 100764. Проаналізовано бленди, що включають дублет $\text{Li I } 670.8$ нм, у спектрах N -зір $AW \text{ Cyg}$ та $UX \text{ Dra}$. Отримано оцінки $\lg N(\text{Li}) = 2, 1.4$ і 0.9 для $HD 100764$, $AW \text{ Cyg}$ та $UX \text{ Dra}$ відповідно. Різниця оцінок вмісту літію $\lg N(\text{Li})$ для використаних списків молекулярних ліній не перевищують 0.2 dex .

ON ESTIMATIONS OF LITHIUM ABUNDANCE IN CARBON STAR ATMOSPHERES USING MODERN LINE LISTS, by Yakovina L. Ya., Pavlenko Ya. V., Abia C., Rosenbush A. E. — We determined the lithium abundance in the atmospheres of three carbon stars from resonance doublet $\text{Li I } 670.8 \text{ nm}$ using fits of synthetic spectra to the observed spectra in the region $668\text{--}674 \text{ nm}$. We calculated synthetic spectra with the use of the modified atomic line list from the VALD database and of three variants of CN and C_2 line lists, which are modifications of lists from Jorgensen's site (<http://stella.nbi.dk>) and from Kurucz's database (1993, CD-ROM NN 1–23). These line lists were tested by fitting synthetic spectra to the observed spectra of the Sun, Arcturus and the early R star $HD 100764$. The blends included doublet $\text{Li I } 670.8 \text{ nm}$ were analysed in the spectra of two N stars, $AW \text{ Cyg}$ and $UX \text{ Dra}$. We estimated $\log N(\text{Li}) = 2, 1.4$, and 0.9 for $HD 100764$, $AW \text{ Cyg}$, and $UX \text{ Dra}$, respectively. Distinctions in estimations of lithium abundance $\log N(\text{Li})$ for the used molecular line lists do not exceed 0.2 dex .

ВВЕДЕНИЕ

Содержание лития в атмосферах красных гигантов несет информацию о процессах нуклеосинтеза в этих звездах и о перемешивании звездного вещества. Богатые и сверхбогатые литием углеродные гиганты представляют также большой интерес с точки зрения химической эволюции Галактики, поскольку принадлежат к основным поставщикам лития в межзвездную среду вследствие постоянного истечения вещества с поверхностей этих звезд. Однако количественные оценки содержания лития в атмосферах углеродных гигантов сопряжены со многими трудностями. Известно, что в спектрах этих звезд есть не только многочисленные атомные линии, но и наблюдается интенсивное молекулярное поглощение, в основном двухатомными молекулами, включающими углерод. Вследствие сильного блендирования крайне затруднительна локализация уровня континуума. Основным методом анализа таких спектров на сегодняшний день является метод синтетического спектра. Для расчета синтетических спектров необходимы модели атмосфер исследуемых звезд и списки атомных и молекулярных линий. Получение такой информации удовлетворительной точности и на сегодняшний день является большой проблемой.

Во всех работах, где определялось содержание лития $\lg N(\text{Li})$ в углеродных звездах, оценивалась точность результатов. Суммарная

погрешность в работах [6—8, 16] оценивается как $\lg N(\text{Li}) = 0.4 \dots 0.5$. При этом наиболее сильно на оценки содержания лития влияют такие параметры атмосферы, как эффективная температура ($T_{\text{эф}}$) и отношение содержания углерода и кислорода (C/O). Важна также точность описания бленд, включающих линии лития, и точность локализации уровня континуума в наблюдаемом спектре.

Точность описания наблюдаемого спектра звезды синтетическим спектром при достаточно хорошо известных параметрах атмосферы звезды более всего зависит от полноты и точности списков атомных и молекулярных линий, которые используются при расчете синтетических спектров. Известно, что точность этих списков на сегодняшний день часто неудовлетворительна. Определив и сравнив между собой содержания лития в атмосферах трех углеродных звезд для разных вариантов списков линий молекул CN и C₂, мы оценили возможный вклад этого фактора в общую погрешность $\lg N(\text{Li})$.

В работе использованы три варианта списков молекулярных линий, за основу которых взяты списки из наиболее известных и доступных баз данных. Определены содержания лития в атмосфере ранней R-звезды HD 100764 и двух N-звезд — AW Cyg и UX Dra. Рассчитан и проанализирован состав бленды, включающей резонансную линию лития, в спектрах исследовавшихся N-звезд.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Спектры HD 100764 были получены в январе 2001 г. и январе 2002 г. с помощью кудэ-эшелле-спектрометра, установленного на 2-м телескопе Международного центра астрономических и медико-экологических исследований (пик Терскол, Северный Кавказ) [2]. Для регистрации спектров использовались камера WI (Райт Инструментс, Великобритания) и ПЗС-матрица фирмы EEV (1242 × 1152 пкл, размер пиксела 22.5 × 22.5 мкм). Первичная стандартная обработка спектрограмм выполнена с помощью программного пакета DECH20, разработанного в САО РАН [1]. Окончательная обработка участков спектра выполнена с помощью программного пакета SPE (С. Г. Сергеев, КрАО). Для области 670.8 нм мы располагали двумя спектрами. В одном из них (№ 1), с более высоким разрешением и с разрывами между порядками, была область длин волн перед 670.8 нм, обрывающаяся перед линией лития, в другом (№ 2), с более низким разрешением, область линии лития была в наличии полностью, но в виде двух участков в разных порядках.

Спектры AW Cyg и UX Dra были получены К. Абиа в 1998–2001 гг. в обсерватории Roque de los Muchachos на телескопах WHT (William Herschel Telescope, 4.2 м) и NOT (Nordic Optical Telescope, 2.5 м) со спектрографами UES и SOFIN соответственно. Обработка производилась по стандартной процедуре с использованием пакета

программ IRAF. Более детальная информация о наблюдательном материале для указанных звезд и использовавшейся аппаратуре содержится в работе [9].

МОДЕЛИ АТМОСФЕР И СИНТЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ

Модели атмосфер HD 100764, AW Cyg и UX Dra рассчитывались по программе Я. В. Павленко SAM12 [3, 4]. Она предназначена для расчета моделей атмосфер красных гигантов в классических приближениях и позволяет рассчитывать модели атмосфер для звезд с заданным (в общем случае не солнечным) химическим составом. Для углеродных звезд учитываются специфические источники непрозрачности в их атмосферах. Возможен учет изотопного состава углерода. Детали программы SAM12 описаны в ряде работ, например [3, 4].

Параметры атмосфер исследовавшихся звезд по данным [9, 17] приведены в табл. 1. Из этих же работ были взяты данные о химическом составе атмосфер звезд. Содержания элементов, которые не определялись в работах [9, 17], принимались такими же, как в моделях Курца на CD-ROM N13 [28], за исключением содержаний азота, кислорода и железа. Для них мы взяли значения, рекомендованные в работах [18, 30].

Таблица 1. Параметры атмосфер исследовавшихся звезд

Звезда	$T_{\text{эф}}/\lg g/[\text{Fe}/\text{H}]$	C/O	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	V_t , км/с	Литературный источник
HD 100764	4850/2.2/-0.59	4.8	4	2.6	[17]
AW Cyg	2760/0.0/0.00	1.03	21	—	[9]
UX Dra	2900/0.0/-0.20	1.05	26	—	[9]

Синтетические спектры рассчитывались также в рамках классических приближений по программе WITA6 [33]. В этой программе большинство потенциалов диссоциации молекул, а также постоянные диссоциативного равновесия брались из работы [41]. Для молекул C_2 , CN и MgH мы взяли более поздние оценки потенциалов диссоциации из работ [11, 20, 42] соответственно. Использовалась та же система источников непрозрачности в континууме, что и при расчете моделей атмосфер. Для конкретной звезды задавались тот же химический состав, отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ изотопов углерода и микротурбулентная скорость, с которыми рассчитывалась модель атмосферы. Мы не учитывали изотопный состав лития, т. е. полагали весь литий в виде ^7Li . Список молекулярных систем, линии которых мы учитывали в рассматриваемой области, приведен в табл. 2. В ней мы приводим также

Таблица 2. Системы двухатомных молекул, линии которых учитывались при расчёте синтетических спектров

Молекула	Переход	Система	D_0 , эВ
$^{12}\text{C}^{14}\text{N}, ^{13}\text{C}^{14}\text{N}$	$A^2 - X^2$	Красная	7.738 [20]
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}^{13}\text{C}, ^{13}\text{C}^{13}\text{C}$	$d^3_g - a^3_u$	Свана	6.297 [42]
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}^{13}\text{C}, ^{13}\text{C}^{13}\text{C}$	$A^1P_u - X^1_g$	Филлипса	6.297 [42]

использовавшиеся значения потенциалов диссоциации молекул CN и C_2 . Описанию списков линий, которые мы использовали при расчете синтетических спектров, мы посвящаем следующий раздел.

Для сравнения с наблюдениями синтетические спектры сворачивались с гауссианой, которая использовалась для моделирования инструментального уширения и макротурбуленции. Подобранный по наблюдаемому спектру значение полуширины гауссианы мы использовали как характеристику разрешения в спектре. Наблюдаемые и синтетические спектры сравнивались в интервале $\lambda = 668 \dots 674$ нм. Синтетические спектры рассчитывались в остаточных интенсивностях. Наблюдаемые спектры были представлены в нормированных потоках. Изменяя уровень нормировки путем введения поправочного коэффициента p , мы добивались наилучшего совмещения наблюдаемого и синтетического спектров, следуя определенным критериям. Этой процедурой мы фактически подбирали уровень континуума в наблюдаемом спектре. Зафиксировав этот уровень, мы подбирали содержание лития по профилю бленды, содержащей линию лития. Наш критерий совмещения наблюдаемого и синтетического спектров состоял в том, чтобы наилучшим образом совместить как избранные локальные минимумы интенсивности, так и максимумы. При этом синтетический спектр не должен быть систематически глубже наблюдаемого, так как в синтетическом спектре всегда имеет место дефицит учтенных линий поглощения.

Привязку наблюдаемого и синтетического спектров можно произвести достаточно надежно, если в исследуемой области есть достаточно сильные и мало блендированные атомные линии с хорошо известными значениями сил осцилляторов. В спектрах углеродных гигантов в области резонансной линии Li I $\lambda = 670.8$ нм наблюдаются несколько сильных атомных линий. Однако все они, кроме линии Ca I $\lambda = 671.8$ нм, принадлежат линиям тяжелых элементов, силы осцилляторов которых мы не могли проверить, а также сильно блендированы молекулярными линиями. Поэтому мы фактически производили привязку наблюдаемого и синтетического спектров по молекулярному спектру, добиваясь при этом также удовлетворительного описания бленды с линией Ca I $\lambda = 671.8$ нм.

**ФОРМИРОВАНИЕ СПИСКОВ ЛИНИЙ
ДЛЯ ОБЛАСТИ РЕЗОНАНСНОЙ ЛИНИИ Li I 670.8 НМ**

Обзор литературных источников. Первой работой, где методом синтетического спектра были определены содержания лития в атмосферах углеродных гигантов, была работа Денна и др. [16]. В ней были сделаны оценки содержаний лития в атмосферах 29 углеродных гигантов галактического диска. Это были те же звезды, для которых в известной работе Ламберта и др. [29] были определены содержания С, N, O, отношения С/О и $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. Список атомных линий для расчета синтетических спектров был скомпилирован на основе списка Куруца и Пейтреманн [26]. Длины волн и факторы Хенля — Лондона вращательных линий CN рассчитывались с помощью программы Котлара [23]. Силы осцилляторов полос CN были взяты из других источников. Для линий, данные о которых содержались и в лабораторном списке Дэвис и Филлипса [13], рассчитанные длины волн были заменены на измеренные. Список линий молекулы C_2 был основан на лабораторном спектре Амиота (Amiot C., 1982, частное сообщение).

В работе Абиа и др. [6], посвященной анализу суперлитиевой звезды IY Nu , силы осцилляторов gf самых сильных атомных линий в области резонансной линии лития были получены путем описания льежского атласа солнечного спектра. Для остальных атомных линий использованы значения gf из списка Куруца и Пейтреманн [26] с некоторыми модификациями на основании других работ. Из молекулярных линий в расчет синтетического спектра были включены только линии красной системы CN из лабораторного списка [13].

В работах Абиа, Боффина и др. [7, 12] было проведено самое массовое определение содержаний лития в галактических углеродных звездах. В работе [12] приведены результаты измерения эквивалентных ширин линии Li I 670.8 нм и/или оценки содержаний лития по этой линии методом синтетического спектра примерно в 200 галактических звездах, а в работе [7] описана процедура их получения и проведен анализ результатов по 161 звезде из указанной выборки. Список атомных линий был взят из компиляции [26]. Силы осцилляторов атомных линий проверялись путем описания атласа солнечного спектра в потоках Куруца и др. [27]. Список линий CN был основан на списке Йоргенсена с ленты SCAN-CN, описанном в работе Йоргенсена и Ларссона [21]. Этот список был несколько модифицирован и предоставлен авторам Совалом (J. Sauval, частное сообщение). Линии C_2 в этой работе не учитывались.

Масштабное исследование содержаний лития в красных гигантах Магеллановых облаков (включающих и углеродные звезды) было проведено в работах Плеза, Смита и Ламберта [35, 40]. Для расчета синтетических спектров были использованы списки атомных линий [26] и Куруца (1989, частное сообщение). Для линий, представляющих интерес, силы осцилляторов были уточнены по ряду других источни-

ков. Списки линий красной системы CN были взяты с ленты SCAN-CN [21] и в областях, используемых для анализа, откорректированы по лабораторному списку [13].

В работах [5, 8] определялось содержание лития в трех суперлиевых углеродных гигантах WZ Cas, WX Cyg и IY Nuа по резонансной и субординатным линиям лития с учетом отклонений от ЛТР. Использувавшиеся списки атомных линий были модификациями списков из базы данных VALD [25]. Для молекулы C₂ в работе [8] списки линий системы Свана были взяты из базы данных Куруца [28], а списки линий системы Филлипса рассчитаны как в [15]. Списки линий CN были подготовлены П. Лаверни, как описано в работах [14, 15]. За основу были взяты списки Йоргенсена с ленты SCAN-CN [21], и П. Лаверни была проведена уникальная модификация этих списков, а именно:

- были рассчитаны в возможном объеме более точные длины волн линий ¹²CN по программе, основанной на работе Котлара и др. [24]. Они в свою очередь были еще откорректированы по лабораторному списку [13] и некоторым другим лабораторным данным. Этими значениями были заменены длины волн соответствующих линий ¹²CN в списке с ленты SCAN-CN;
- корректировались также длины волн ¹³CN, как описано в работе [15];
- силы осцилляторов линий рассчитывались индивидуально для каждой изотопной молекулы CN. Согласно рекомендации [21] все они затем были умножены на фактор 0.734.

Отметим также, что описанные модифицированные списки линий CN значительно короче оригинальных списков Йоргенсена.

Все списки молекулярных линий в работе [5] были взяты из базы данных Куруца [28] с CD-ROM N 18. При этом длины волн в списке линий ¹³CN были уменьшены на 0.05 нм для устранения обнаруженного авторами систематического сдвига.

Т. Киппер [22] определил содержания ряда химических элементов, в том числе лития, а атмосферах пяти углеродных гигантов, используя исследованные и улучшенные им списки атомных и молекулярных линий Белла (R. Bell 1976, частное сообщение; <http://ccp7.dur.ac.uk/ccp7/DATA/lines.bell.tar.Z>). Сравнение списков Белла и Йоргенсена [21] для красной системы CN, проведенное Т. Киппером, показало, что они сравнимого качества и практически равноценны в области резонансного дублета лития. Списки Белла были дополнены Т. Киппером линиями C₂, рассчитанными в университете Индианы (Indiana University line tapes, D. R. Alexander, 1991, частное сообщение).

В работах [10, 14] исследовался химический состав углеродных звезд в Местной группе галактик. Определялись содержания большого числа химических элементов (в том числе лития), и из этих работ

невозможно выделить информацию, касающуюся только области

670.8 нм. Отмечено, что кроме использовавшихся и ранее источников для корректировки и дополнения списков атомных линий в этих работах использовались еще база данных DREAM [Bi'émont E., Palmeri P., Quinet P. D.R.E.A.M. Database on Rare Earth at Mons. Univ., <http://www.umh.ac.be/~astro/dream.shtml>], содержащая списки линий большого числа ионов редкоземельных элементов (REE), и база данных Куруца [28]. Приведены ссылки на источники использовавшихся в работах [10, 14] списков молекулярных линий.

Бленда, включающая линию Li I 670.8 нм, рассматривалась рядом авторов для звезд, более горячих, чем N—J-звезды. Списки линий в области 670.72...670.81 нм приведены в работах Ламберта и др. [31] и Редди и др. [38]. Они включают атомные линии и линии ^{12}CN , взятые из списка, использовавшегося в работе Денна и др. [16]. Список линий для окрестностей линии Li I 670.8 нм в работе А. В. Шавриной и др. [39] наиболее полно представляет вклад линий ионов редкоземельных элементов (REE) в литиевую бленду. Он включает не только линии REE из баз данных VALD [25] и DREAM, но также рассчитанные А. В. Шавриной по данным базы NIST [Martin W. C., Sugar J., Musgrove A. 2001. — Energy Levels Database, <http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData>] дополнительные линии однократно и двукратно ионизированных REE. База NIST содержит значения уровней энергии REE, и А. В. Шавриной были рассчитаны все допустимые правилами отбора переходы для диапазона длин волн $\lambda = 670.575...670.875$ нм. Силы осцилляторов рассчитанных линий были подобраны А. В. Шавриной по спектру известной аномальной γAr -звезды HD 101065 (звезды Пшибыльского) [39].

Списки линий в настоящей работе. В качестве основы компилятивного списка атомных линий мы использовали список из базы данных VALD [25] на дату 17 июля 2008 г. Мы дополнили этот список в области резонансного дублета лития линиями ионов REE из списка А. В. Шавриной, приведенного в работе [39]. Мы тестировали наш список и корректировали силы осцилляторов некоторых линий по спектрам Солнца и Арктура. Для этого были использованы атласы Солнца и Арктура Хинкле и др. [19]. Для расчета синтетических спектров этих звезд-стандартов были взяты теоретическая модель атмосферы Солнца Куруца из банка данных [28] (CD-ROM N 13) и полуэмпирическая модель атмосферы Арктура, полученная в работе Петерсон и др. [34]. Химический состав атмосферы Арктура был взят из работы [34]. Также для корректировки значений gf отдельных линий мы использовали список Кастелли [Castelli F. <http://www.user.oat.ts.astro.it/castelli>] и список, использовавшийся в работе Абиа и др. [10]. Кроме атомных линий при расчете синтетических спектров Солнца и Арктура мы учитывали линии CN. Откорректированный нами список атомных линий из базы данных VALD мы будем дальше называть VALD-cor.

В настоящей работе мы использовали три варианта списков молекулярных линий для области 668...674 нм, за основу которых взяты списки линий CN и C₂ с сайта Йоргенсена [*Jorgensen U. G.* <http://stella.nbi.dk>] и из базы данных Куруца [28]. Списки линий красной системы CN на сайте Йоргенсена — это списки с ленты SCAN-CN, описанной в работе [21]. Списки C₂ — списки Керси [36, 37], приведенные Йоргенсеном к стандартному виду. Значения *gf* в этих списках обновляются Йоргенсеном по мере поступления новых данных.

Наши варианты были следующие.

1. Списки линий CN и C₂ с сайта Йоргенсена [<http://stella.nbi.dk>], где мы откорректировали длины волн линий красной системы ¹²CN по лабораторному списку [13]. Будем называть этот вариант *Jor.-cor.*

2. Списки линий этих же молекул Куруца [28] с CD-ROM N 18, где список ¹²CN откорректирован аналогично списку Йоргенсена, а длины волн в списке линий ¹³CN уменьшены на 0.05 нм, как в работе [5]. Этот вариант списков линий CN и C₂ будем называть *K18-cor.*

3. Компилятивный список, который мы назовем LJQ (Laverni — Jorgensen — Quercì). В него включены списки линий ¹²CN и ¹³CN, использовавшиеся в работе [8] и описанные нами выше, и списки C₂ с сайта Йоргенсена. Указанный вариант списка списков линий CN будем называть LJ.

Длины волн красной системы ¹²CN в оригинальных списках Йоргенсена и Куруца мы корректировали на основе лабораторного списка [13] следующим образом. Вначале мы проанализировали разности между рассчитанными и измеренными длинами волн для ветвей тех полос, которые содержатся в лабораторном списке и линии которых попадают в область линии Li I 670.8 нм (7 3, 6 2, 5 1 и 12 7). Оказалось, что внутри каждой ветви эти разности систематически возрастают с увеличением вращательного квантового числа нижнего уровня перехода, и такие зависимости носят не вполне гладкий характер. Регулярные различия вносят рассчитанные длины волн, а небольшой разброс точек — измеренные. К тому же в измеренных ветвях отсутствуют некоторые линии. Потому мы не просто заменяли в рассчитанных списках длины волн на измеренные значения, а для всех ветвей лабораторного списка аппроксимировали полиномами зависимости длин волн от вращательных квантовых чисел и рассчитали сглаженные (и без пропусков) лабораторные значения. Эти значения длин волн мы использовали для замены рассчитанных значений для соответствующих квантовых чисел. В самой бленде, содержащей линию Li I 670.8 нм, мы заменили рассчитанные длины волн на оригинальные лабораторные значения для линий красной системы ¹²CN 7 3 P₁₂(13), 12 7 Q₁(28), 12 7 Q₂(29) и 6 2 Q₂(44), как это было сделано в работах [8, 31, 38] и др.

Отметим, что в работе [21] рекомендуется умножить значения сил осцилляторов линий в списке SCAN-CN на коэффициент 0.734, учитывая результаты двух более поздних и более точных работ по расчету

значений f . Это было сделано в списке П. Лаверни для работы [8]. Таким образом, у нас этот коэффициент учитывается в списке LJQ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы получили хорошие описания спектров Солнца и Арктура синтетическими спектрами с нашим списком атомных линий и списком CN, включенном в список LJQ. Описание спектра Арктура иллюстрирует рис. 1, а. По нему можно грубо оценить качество списка линий CN. Видно, что по интенсивности рассчитанный спектр CN удовлетворительно соответствует наблюдаемому. Отметим, что по спектрам Солнца и Арктура мы могли проверить и улучшить силы осцилляторов только тех атомных линий, которые видны в этих спектрах. В основном это были линии элементов группы железа и более легких элементов. Однако в спектрах углеродных гигантов многочисленны и сильны также линии тяжелых элементов. Их силы осцилляторов проверить и откорректировать мы не могли. Вклад линий элементов с атомным номером $Z \leq 37$ в синтетический и атомный спектры, рассчитанные для углеродного гиганта UX Dra, мы показываем на рис. 1, б.

Мы использовали спектры R0-звезды HD 100764 для проверки молекулярных списков линий, использовавшихся в настоящей работе. Параметры атмосферы звезды приведены в табл. 1, значение микро-турбулентной скорости при расчете синтетических спектров принималось равным $V_t = 2.5$ км/с.

Отметим, что эта звезда очень хороша для анализа спектров углеродных молекул, так как у нее большой дефицит металлов ($[Fe/H] = 0.59$), из-за чего слабы атомные линии, и большое значение отношения C/O из-за высокого содержания углерода $[C] = 0.47$ и низкого содержания кислорода $[O] = -0.53$. На рис. 2 мы приводим описание синтетическими спектрами области линии Li I 670.8 нм в спектре HD 100764. Участок перед линией лития мы иллюстрируем на рис. 2 по спектру № 1 ($\lambda = 0.012$ нм), а ближайшие окрестности линии лития и область за ней — на рис. 3 по спектру № 2 ($\lambda = 0.016$ нм).

Из рис. 2 и 3 можно сделать вывод, что описания области резонансной линии лития с использованием трех списков молекулярных линий примерно равноценны. Спектр C₂ для HD 100764 слаб, так что этот вывод относится в основном к спискам CN. Детали спектра лучше всего описывает список LJQ. Рассчитанная бленда, включающая линию Li I 670.8 нм, несколько глубже наблюдаемой при использовании списка молекулярных линий Jog.-cor. и несколько слабее наблюдаемой при использовании списков LJQ и K18-cor. Отметим, что со списком Jog.-cor., где силы осцилляторов линий CN умножены на коэффициент 0.734, спектр HD 100764 в области 668...674 нм в целом описывается хуже, чем при использовании оригинальных списков с ленты SCAN-CN.

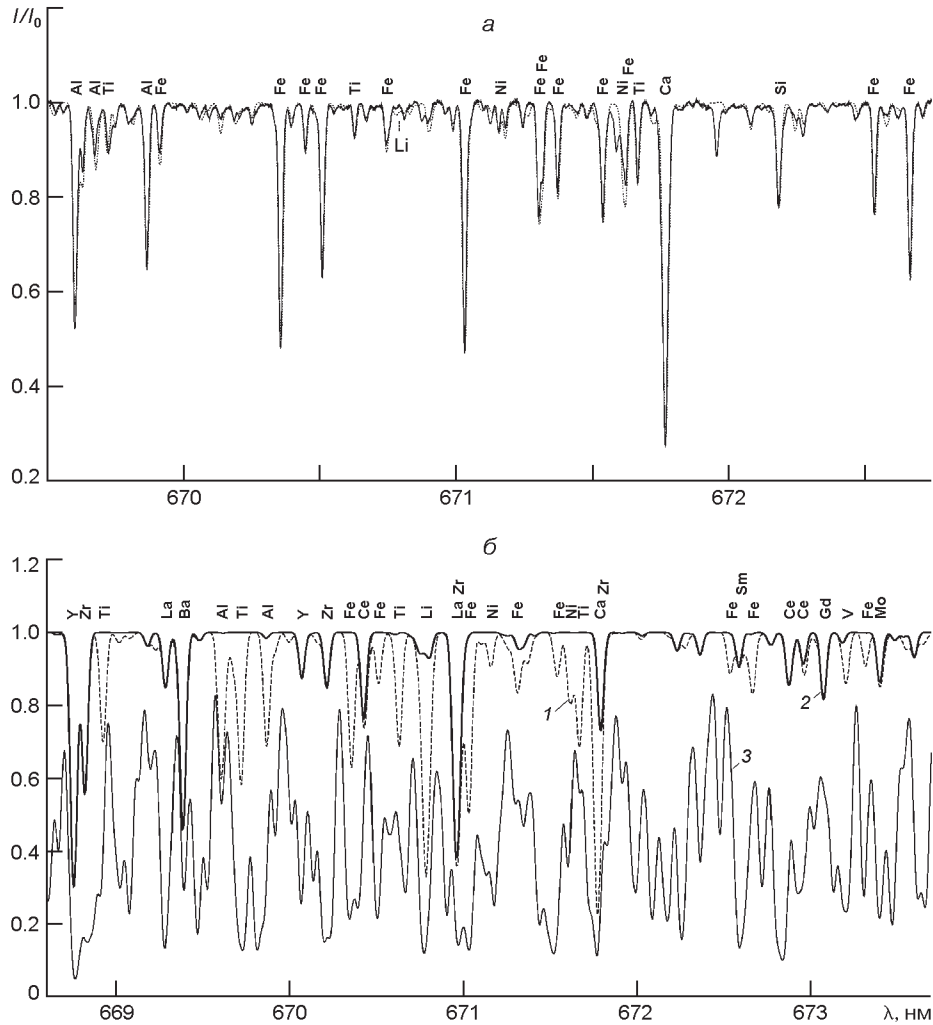


Рис. 1: *a* — описание спектра Арктур (сплошная линия) синтетическим спектром (пунктир) со списками линий VALD-cog. + CN(LJ); *b* — вклад линий тяжелых элементов ($Z > 37$, сплошная линия 2) в теоретический атомный (штриховая линия 1) и синтетический (тонкая сплошная линия 3) спектры звезды UX Dra (списки линий VALD-cog. и LJQ, $\lg N(\text{Li}) = -1.0$)

С нашими списками линий мы сделали оценки содержания лития в атмосфере HD 100764, хотя линия лития в спектре этой звезды явно не выделяется. Они приведены в верхней строке табл. 3. Мы оценили содержание лития и для списка линий Jog.-cog. с учетом коэффициента 0.734. Это привело к некоторому изменению коэффициента p , корректирующего уровень континуума, а оценка получилась такая же, как для оригинального списка Jog.-cog.

Описание синтетическими спектрами спектров звезд UX Dra и AW Cyg при использовании списка молекулярных линий LJQ мы приводим на рис. 4. Микротурбулентная скорость при расчете синте-

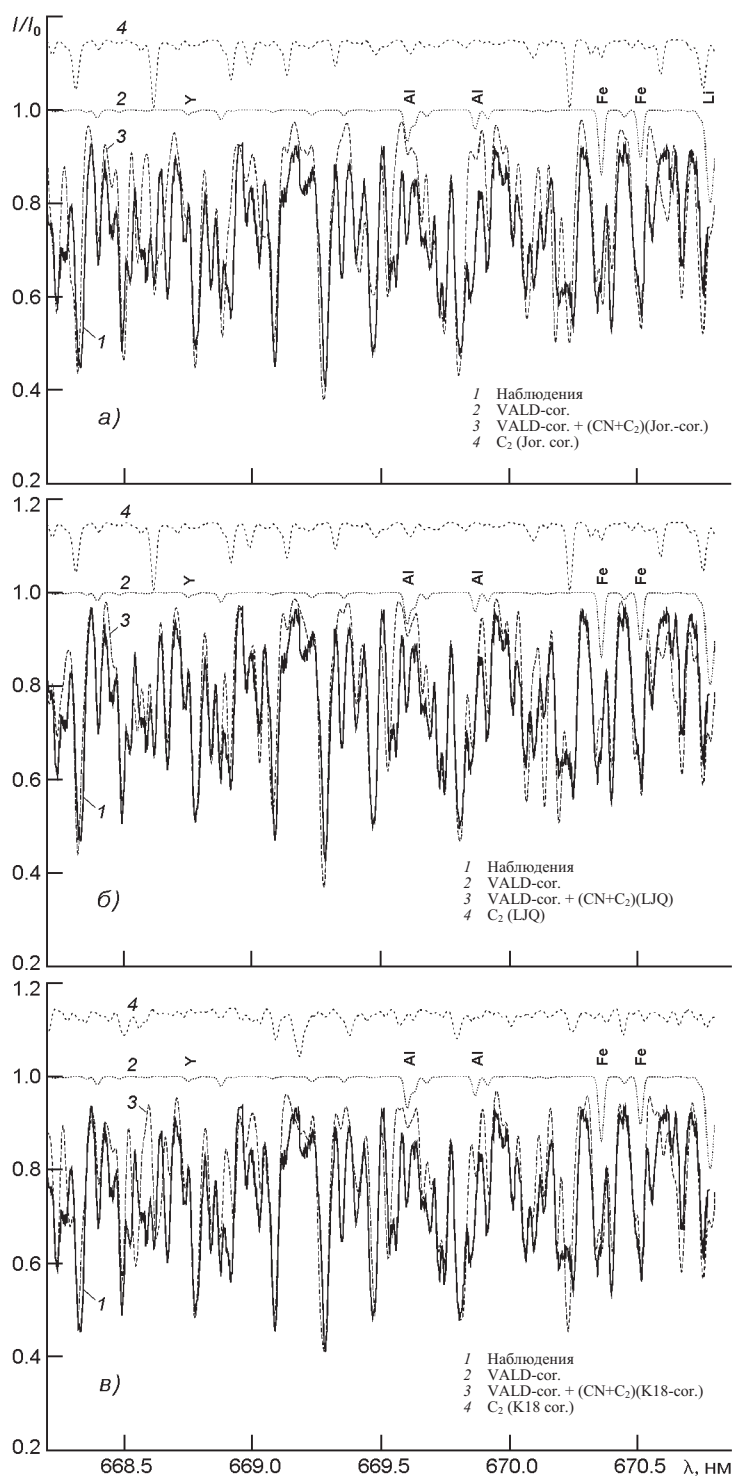


Рис. 2. Описание спектра HD 100764 для участка 668...671 нм синтетическими спектрами при использовании трех вариантов списков линий CN и C₂. Рассчитанные спектры C₂ сдвинуты вверх на 0.15 для удобства

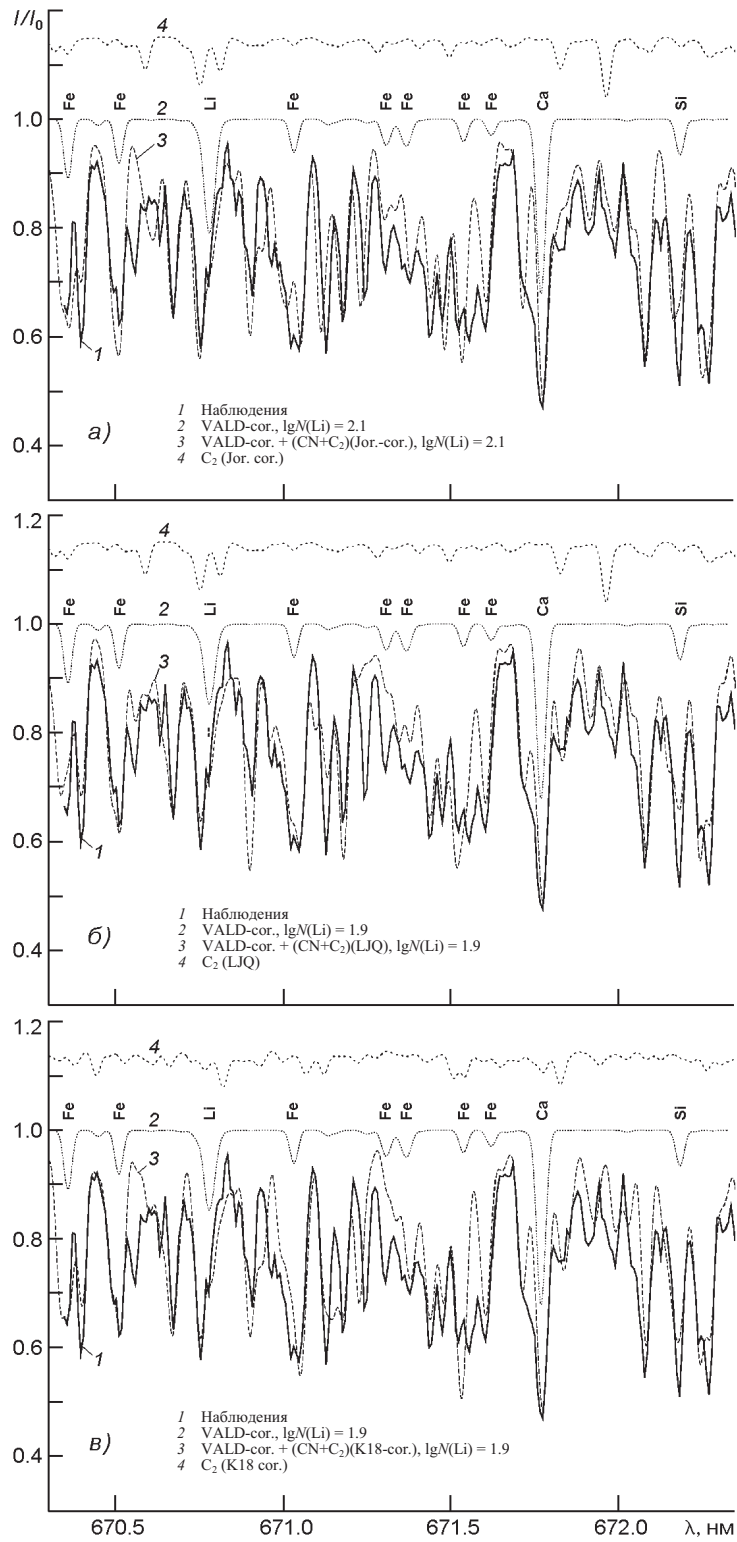


Рис. 3. То же, что на рис. 2 для участка 670...673 нм

Таблица 3. Содержания лития в атмосферах трех углеродных звезд при использовании разных вариантов списков молекулярных линий

Звезда	Jor.-cor.	LJQ	K18-cor.	[16]	[12]
HD 100764	2.1	1.9	1.9	—	—
AW Cyg	-1.4	-1.3	-1.4	—	+1.2
UX Dra	-0.9	-0.9	-0.9	-0.6	+0.8

тических спектров равнялась 3 км/с. Мы подобрали параметр гауссова уширения $\sigma = 0.025$ нм для спектра AW Cyg и $\sigma = 0.023$ нм для спектра UX Dra.

Оценки содержания лития в атмосферах AW Cyg и UX Dra для списков молекулярных линий Jor.-cor., LJQ и K18-cor. приведены в табл. 3. Видно, что они отличаются не более чем на 0.1 dex. Мы проверили также, что коррекция сил осцилляторов линий CN в списке Jor.-cor. путем умножения их на 0.734 не изменяет приведенные оценки содержания лития.

Мы рассмотрели состав бленды, включающей линию лития, в спектрах холодных углеродных гигантов AW Cyg и UX Dra, используя наш список атомных линий и описанные выше варианты списков молекулярных линий. Звезда UX Dra имеет типичные характеристики N-звезд, и для нее на рис. 5 мы показываем вклад линии Li I 670.8 нм и линий молекул CN и C₂ в литиевую бленду для трех вариантов списков молекулярных линий.

Из рис. 5 видно, что линию лития в спектре UX Dra блендируют в основном линии CN, однако значителен и вклад линий C₂. Вклад других атомных линий, как видно из рис. 5, а, относительно невелик. Из рис. 5, б также видно, что в поглощение молекулой C₂ основной вклад дает система Филлипса, а система Свана очень слаба. На рис. 5, в показан отдельный вклад в поглощение ¹²CN и ¹³CN для списка LJQ. Отметим, что спектры ¹³CN для трех рассмотренных списков молекулярных линий очень близки. Все списки линий не очень хорошо описывают правое крыло литиевой бленды. Рассчитанный максимум интенсивности на 670.84 нм ниже, чем в наблюдаемом спектре, особенно при использовании списка K18-cor. Это говорит об избыточном учете поглощения в этом участке спектра. Определить, какой из трех основных вкладчиков в этом интервале, ¹²CN, ¹³CN или система Филлипса молекулы C₂, дает избыточное поглощение — сложно. Можно лишь сказать, что в случае списка K18-cor. более всего неудовлетворительна точность списка линий системы Филлипса.

В табл. 4—6 мы приводим списки линий в ближайших окрестностях линии Li I 670.8 нм при использовании нашего списка атомных линий VALD-cor. и списков молекулярных линий Jor.-cor., K18-cor и LJQ. В списках Куруца с CD-ROM N18 [28] содержится отождеств-

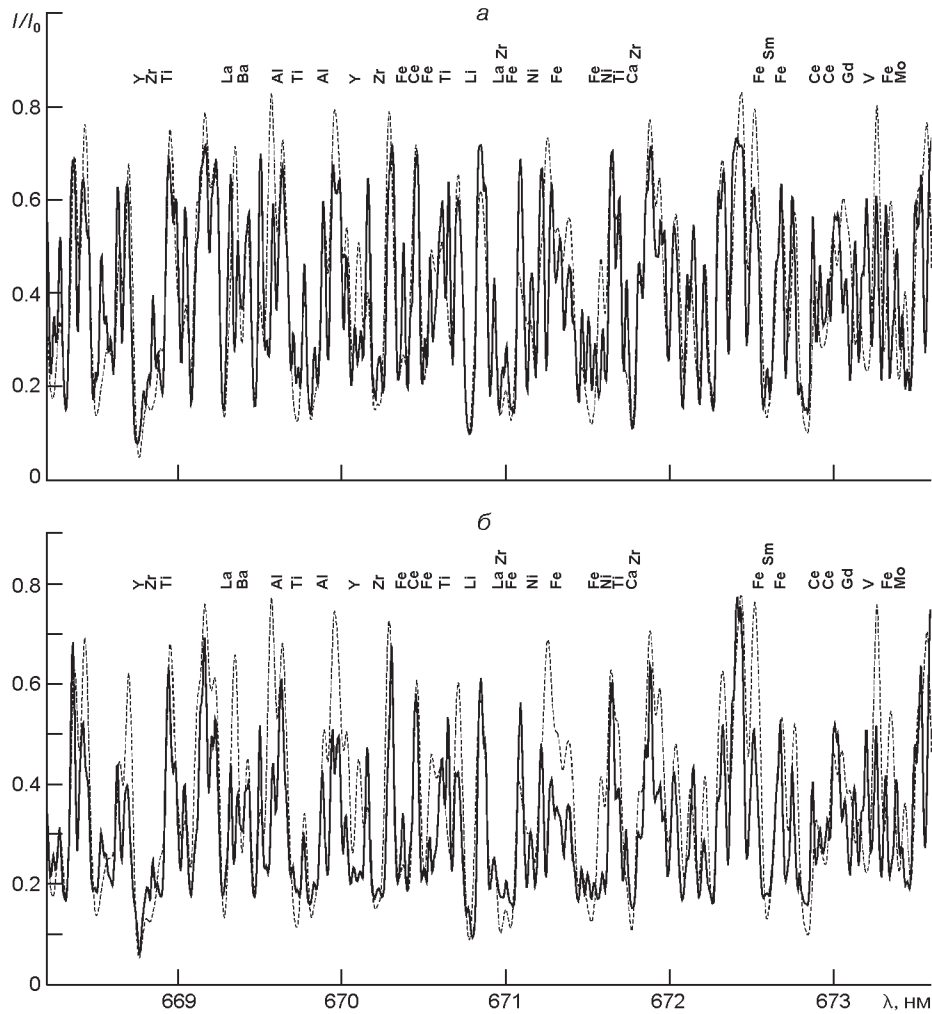


Рис. 4. Описание наблюдаемых спектров звезд (сплошные линии) синтетическими спектрами (штриховые линии) при использовании списка молекулярных линий LJQ: *a* — UX Dra, $\lg N(\text{Li}) = -0.9$; *б* — AW Cyg, $\lg N(\text{Li}) = -1.3$

ление всех молекулярных линий, то есть для каждой линии известна электронная система и приведены колебательные и вращательные квантовые числа перехода. На сайте Йоргенсена [<http://stella.nbi.dk>] есть отождествление для линий CN, но нет его для линий C₂, а для списка LJQ у нас не было отождествления для обеих молекул. Для всех линий в табл. 4–6 указаны несглаженные центральные остаточные интенсивности r^0 в спектрах UX Dra и AW Cyg. Значения r^0 рассчитывались по программе WITA6 [33] как отношения потоков в центре линии к потокам в континууме. Мы включили в табл. 4–6 линии с $r^0 < 0.95$. Величины r^0 для линий лития в табл. 4–6 рассчитаны при содержаниях лития, приведенных в табл. 3 для конкретных списков линий и конкретных звезд.

Табл. 4–6 показывают следующее.

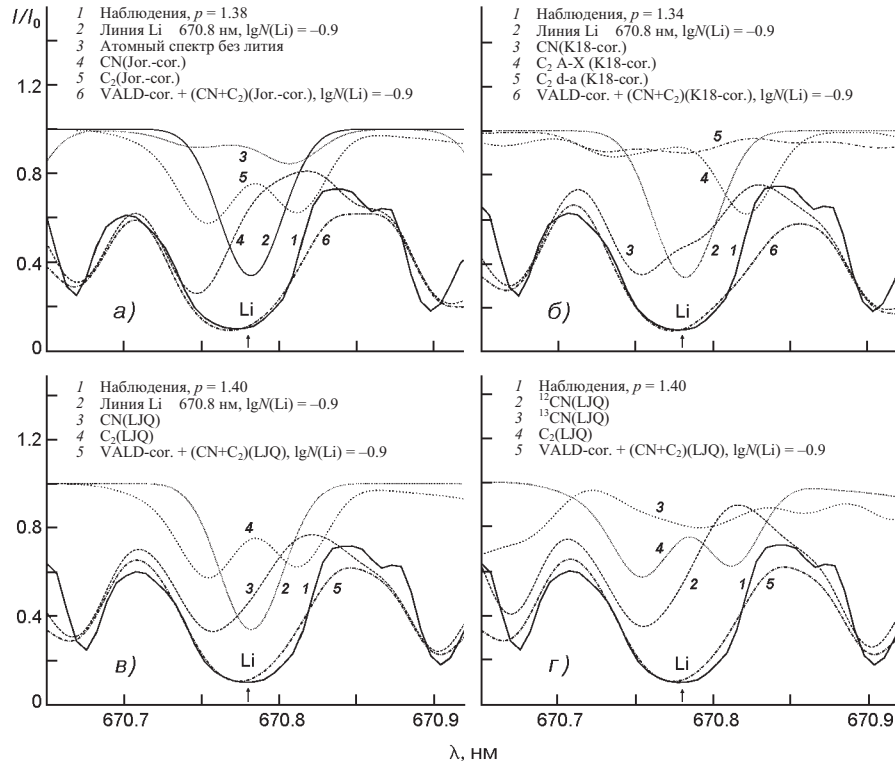


Рис. 5. Состав бленды с линией Li I 670.8 нм в спектре UX Dra при использовании списков молекулярных линий Jor.-cor., LJQ и K18-cor

В литиевой бленде резонансный дублет лития является наиболее интенсивным компонентом. Из блендирующих атомных линий наиболее сильна линия V I 670.81 нм $r^0 = 0.55$ и 0.67 в спектрах AW Cyg и UX Dra соответственно. Близкая к дублету лития линия Fe I 670.7432 в спектрах рассмотренных N-звезд имеет остаточную интенсивность 0.9. Остальные атомные линии, имеющие остаточные интенсивности 0.8...0.9, принадлежат тяжелым элементам.

Списки линий CN Jor.-cor и K18-cor. дают одинаковый набор линий ^{12}CN и ^{13}CN в литиевой бленде, и интенсивности этих линий хорошо согласуются. Из последней графы табл. 4 видно, что и положения линий CN в списках Jor.-cor и K18-cor. в целом хорошо согласуются. Для линий ^{12}CN расхождения несистематические. Самая большая разница $\Delta_{JK} = \lambda_{\text{Jor. cor.}} - \lambda_{\text{K18 cor.}}$ в пределах литиевой бленды составляет 0.06 нм для сильной линии $^{12}\text{CN R}_1$ (64) полосы 5-1. Кроме нее, наиболее сильные линии CN в рассмотренном интервале - это линии $^{12}\text{CN 7-3 P}_{12}$ (13), $^{12}\text{CN 6-2 Q}_2$ (44) и $^{12}\text{CN 6-2 P}_{12}$ (33). В длинах волн ^{13}CN в списках Jor.-cor и K18-cor. наблюдается небольшое систематическое различие $\Delta_{JK} < 0.004$ нм из-за недостаточно точной корректировки длин волн линий ^{13}CN в списке Куруца путем введения одного значения сдвига (0.05 нм) для всей области 668...674 нм.

Таблица 4. Состав бленды с линией Li I 670.8 нм в спектрах UX Dra и AW Cyg при использовании списка Jor.-cor., JK = Jor. cor. K18 cor.

λ , нм	$\lg gf$	E , эВ	Вкладчик, отожд. CN A-X	$f_{UX\text{Dra}}^0$	$f_{AW\text{Cyg}}^0$	$JK \lambda$, нм
670.7014	-1.538	1.966	^{12}CN , 11 6, Q2 (47)	0.75	0.73	+0.0091
670.7080	-1.631	0.755	$^{12}\text{C}^{13}\text{C}$	0.92	0.90	
670.7304	-2.040	1.027	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	0.88	0.88	
670.7320	-1.849	1.206	^{12}CN , 5 1, R1 (64)	0.21	0.20	-0.0601
670.7343	-1.369	2.041	^{12}CN , 10 5, Q2 (60)	0.74	0.72	+0.0041
670.7345	-2.325	1.825	^{12}CN , 12 7, P1 (23)	0.92	0.90	-0.0024
670.7352	-2.483	0.813	^{13}CN , 4 0, P1 (60)	0.86	0.79	-0.0310
670.7372	-1.555	0.702	$^{12}\text{C}^{13}\text{C}$	0.88	0.85	
670.7432	-2.350	4.607	Fe I	0.91	0.92	
670.7464*	-3.021	0.791	^{12}CN , 7 3, P12(13)	0.38	0.33	0.0
670.7473	-1.477	0.933	Sm II	0.88	0.87	
670.7501	-2.904	0.744	^{13}CN , 7 3, R12(6)	0.92	0.88	+0.0037
670.7521	-2.400	0.744	^{13}CN , 7 3, Q1 (6)	0.79	0.69	+0.0038
670.7529*	-1.897	1.881	^{12}CN , 12 7, Q1 (28)	0.83	0.81	0.0
670.7529*	-1.897	1.894	^{12}CN , 12 7, Q2 (29)	0.84	0.82	0.0
670.7529*	-1.503	0.956	^{12}CN , 6 2, Q2 (44)	0.06	0.07	0.0
670.7534	-2.253	1.001	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	0.92	0.91	
670.7543	-0.992	0.859	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	0.16	0.20	
670.7620	-2.266	1.001	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	0.92	0.92	
670.7675	-3.205	0.956	^{12}CN , 6 2, P21(44)	0.68	0.63	-0.0174
670.7696	-2.065	1.028	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	0.89	0.88	
670.7755	-3.550	0.170	Nd II	0.89	0.83	
670.7761	-0.009	0.000	Li I	0.04	0.03	
670.7831	-2.279	1.001	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	0.92	0.92	
670.7904	-2.060	0.774	^{13}CN , 7 3, Q2 (13)	0.64	0.53	+0.0013
670.7912	-0.309	0.000	Li I	0.17	0.13	
670.7946	-2.895	0.774	^{13}CN , 7 3, P21 (13)	0.93	0.89	+0.0015
670.7957	-2.091	1.028	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	0.90	0.89	
670.8030	-1.130	1.522	Nd II	0.87	0.83	
670.8094	-3.113	1.218	V I	0.67	0.55	
670.8099	-2.120	0.701	Ce II	0.91	0.90	
670.8128	-2.140	0.801	^{13}CN , 7 3, R1 (17)	0.71	0.61	+0.0004
670.8137	-1.246	0.742	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	0.17	0.21	
670.8418	-2.097	1.979	^{12}CN , 12 7, R2 (35)	0.92	0.91	-0.0048
670.8500	-1.900	1.868	^{12}CN , 11 6, P2 (42)	0.83	0.81	+0.0181
670.8506	-3.206	0.760	^{12}CN , 6 2, P12 (33)	0.46	0.40	-0.0129
670.8506	-2.617	0.754	^{13}CN , 7 3, P2 (9)	0.87	0.80	+0.0031
670.8598	-2.888	0.747	^{13}CN , 7 3, R12 (7)	0.92	0.88	+0.0035

* Длины волн из [13]

В табл. 6 для списка LJQ, начиная с линии ^{12}CN 670.7464 нм, список линий ^{12}CN повторяет список из работы Редди и др. [38]. Несколько отличаются только силы осцилляторов линий (см. последнюю графу табл. 6). Для линий, которые можно отождествить, при сравнении со списками Jor.-cor и K18-cor. видны отличия не только сил осцилляторов, но и потенциалов возбуждения.

Таблица 5. Состав бленды с линией Li I 670.8 нм в спектрах UX Dra и AW Cyg при использовании списка K18-сog

, нм	lggf	E, эВ	Вкладчик	Отождествление	$r_{UX Dra}^0$	$r_{AW Cyg}^0$
670.6923	-1.443	1.966	¹² CN	A-X, 11 6, Q2 (47)	0.71	0.69
670.7003	-1.950	2.069	¹² CN	A-X, 7 2, P2 (83)	0.92	0.92
670.7265	-1.935	1.027	¹² C ¹² C	d-a, 1 4, R1 (17)	0.86	0.85
670.7302	-1.348	2.041	¹² CN	A-X, 10 5, Q2 (60)	0.73	0.71
670.7304	-1.960	1.028	¹² C ¹² C	d-a, 1 4, R2 (16)	0.86	0.86
670.7317	-2.202	0.683	¹² C ¹² C	A-X, 5 0, P (55)	0.69	0.68
670.7369	-2.141	1.825	¹² CN	A-X, 12 7, P1 (23)	0.88	0.86
670.7432	-2.350	4.607	Fe I		0.91	0.92
670.7464*	-3.061	0.791	¹² CN	A-X, 7 3, P12(13)	0.40	0.35
670.7464	-2.926	0.744	¹³ CN	A-X, 7 3, R12(6)	0.93	0.89
670.7473	-1.477	0.933	Sm II		0.88	0.87
670.7483	-2.410	0.744	¹³ CN	A-X, 7 3, Q1 (6)	0.79	0.70
670.7529*	-1.709	1.881	¹² CN	A-X, 12 7, Q1 (28)	0.76	0.74
670.7529*	-1.709	1.894	¹² CN	A-X, 12 7, Q2 (29)	0.77	0.75
670.7529*	-1.594	0.956	¹² CN	A-X, 6 2, Q2 (44)	0.07	0.07
670.7616	-0.959	1.534	¹² C ¹² C	A-X, 11 5, Q (45)	0.85	0.84
670.7635	-2.149	1.001	¹² C ¹² C	d-a, 0 3, R1 (34)	0.90	0.89
670.7662	-2.515	0.813	¹³ CN	A-X, 4 0, P1 (60)	0.87	0.81
670.7713	-2.162	1.001	¹² C ¹² C	d-a, 0 3, R2 (33)	0.90	0.89
670.7755	-3.550	0.170	Nd II		0.89	0.83
670.7758	-1.341	1.542	¹² C ¹² C	A-X, 2 6, R (33)	0.94	0.93
670.7761	-0.009	0.000	Li I		0.04	0.03
670.7849	-3.285	0.956	¹² CN	A-X, 6 2, P21(44)	0.72	0.68
670.7891	-2.069	0.774	¹³ CN	A-X, 7 3, Q2 (13)	0.65	0.54
670.7902	-1.632	1.216	¹² C ¹² C	d-a, 1 4, P1 (36)	0.87	0.86
670.7912	-0.309	0.000	Li I		0.17	0.13
670.7921	-1.967	1.206	¹² CN	A-X, 5 1, R1 (64)	0.25	0.23
670.7931	-2.921	0.774	¹³ CN	A-X, 7 3, P21(13)	0.94	0.90
670.7978	-2.175	1.001	¹² C ¹² C	d-a, 0 3, R3 (32)	0.90	0.90
670.8030	-1.130	1.522	Nd II		0.87	0.83
670.8094	-3.113	1.218	V I		0.67	0.55
670.8099	-2.120	0.701	Ce II		0.91	0.90
670.8124	-2.149	0.801	¹³ CN	A-X, 7 3, R1 (17)	0.72	0.62
670.8214	-1.264	0.695	¹² C ¹² C	A-X, 7 2, Q (33)	0.14	0.18
670.8319	-1.810	1.868	¹² CN	A-X, 11 6, P2 (42)	0.79	0.77
670.8466	-1.902	1.979	¹² CN	A-X, 12 7, R2 (35)	0.88	0.87
670.8475	-2.627	0.754	¹³ CN	A-X, 7 3, P2 (9)	0.87	0.81
670.8517	-1.985	1.028	¹² C ¹² C	d-a, 1-4, R3 (15)	0.87	0.86
670.8563	-2.910	0.747	¹³ CN	A-X, 7 3, R12(7)	0.93	0.89
670.8585	-2.336	0.747	¹³ CN	A-X, 7 3, Q1 (7)	0.76	0.66

* Длины волн из [13]

Линии C₂, включенные в списки Jor.-сog и K18-сog., сравнить сложно, так как в списке Jor.-сog нет их отождествления. Согласно табл. 4—6 в литиевой бленде есть небольшое количество сильных линий C₂ и много слабых, и сильные, как показывает табл. 5, принадлежат системе Филлипа.

Таблица 6. Состав бленды с линией Li I 670.8 нм в спектрах UX Dra и AW Cyg при использовании списка LJO

, нм	lggf	E, эВ	Вкладчик	r_{UXDra}^0	r_{AWCyg}^0	lggf[38]
670.7080	-1.631	0.755	$^{12}C^{13}C$	0.92	0.90	
670.7191	-0.900	2.070	^{12}CN	0.52	0.50	
670.7304	-2.040	1.027	$^{12}C^{12}C$	0.88	0.88	
670.7372	-1.555	0.702	$^{12}C^{13}C$	0.88	0.85	
670.7432	-2.350	4.607	Fe I	0.91	0.92	
670.7464*	-2.769	0.790	^{12}CN	0.24	0.22	-3.012
670.7473	-1.477	0.933	Sm II	0.88	0.87	
670.7511	-2.900	0.740	^{13}CN	0.92	0.88	
670.7521	-1.429	2.170	^{12}CN	0.85	0.83	-1.428
670.7528	-2.400	0.740	^{13}CN	0.78	0.69	
670.7529*	-1.781	2.020	^{12}CN	0.87	0.86	-1.785
670.7529*	-1.781	2.010	^{12}CN	0.87	0.85	-1.785
670.7529*	-1.711	0.960	^{12}CN	0.08	0.08	-1.609
670.7534	-2.253	1.001	$^{12}C^{12}C$	0.92	0.91	
670.7543	-0.992	0.859	$^{12}C^{12}C$	0.16	0.20	
670.7620	-2.266	1.001	$^{12}C^{12}C$	0.92	0.92	
670.7696	-2.065	1.028	$^{12}C^{12}C$	0.89	0.88	
670.7730	-2.480	0.810	^{13}CN	0.86	0.79	
670.7755	-3.550	0.170	Nd II	0.89	0.83	
670.7761	-0.009	0.000	Li I	0.04	0.03	
670.7816	-2.050	1.210	^{12}CN	0.29	0.27	-2.317
670.7831	-2.279	1.001	$^{12}C^{12}C$	0.92	0.92	
670.7902	-2.060	0.770	^{13}CN	0.64	0.52	
670.7912	-0.309	0.000	Li I	0.17	0.13	
670.7934	-2.900	0.770	^{13}CN	0.93	0.89	
670.7957	-2.091	1.028	$^{12}C^{12}C$	0.90	0.89	
670.8030	-1.130	1.522	Nd II	0.87	0.83	
670.8094	-3.113	1.218	V I	0.67	0.55	
670.8099	-2.120	0.701	Ce II	0.91	0.90	
670.8137	-1.246	0.742	$^{12}C^{12}C$	0.17	0.21	
670.8155	-2.139	0.800	^{13}CN	0.71	0.61	
670.8375	-1.170	2.100	^{12}CN	0.69	0.67	-2.252
670.8498	-2.620	0.750	^{12}CN	0.86	0.80	
670.8600	-3.210	0.760	^{12}CN	0.46	0.41	
670.8609	-2.889	0.750	^{13}CN	0.92	0.88	
670.8629	-2.330	0.750	^{13}CN	0.76	0.66	

* Длины волн из [13]

Сравнение нашего списка атомных линий для литиевой бленды со списком Редди и др. в работе [38] обнаружило такие различия.

На месте линии Ti I 670.7752 нм в списке Редди и др. в нашем списке, во всех известных нам модификациях списка VALD и в списке с сайта Куруца [Kurucz R. L. 1995. <http://cfaku5.harvard.edu>], который использовался в работе [38] для формирования списка атомных линий, находится линия Sc I с такой же энергией E возбуждения нижнего уровня и близким значением gf .

Две слабые линии на 670.80 нм в разных исследованиях отождествлялись по-разному. Редди и др. [38] предположили, что это линии $Ti\ I$ 670.8025 и 670.8125 нм, и подобрали их значения E . В спектрах AW Cyg и UX Dra, однако, учет нами этих линий с параметрами Редди и др. привел к сильному искажению литиевой бленды. Так что, видимо, отождествление этих линий неверно, и мы их не учитывали.

Линия $V\ I$ 670.8280 нм, которая есть в списке Редди и др., отсутствует в нашем списке атомных линий и во всех других известных нам списках.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среди рассмотренных списков молекулярных линий невозможно строго выделить лучший. Как уже отмечалось, точнее других детали спектров рассмотренных звезд описывает список LJQ. Однако при его использовании рассчитанная литиевая бленда, как видно из рис. 3, б для HD 100764, отличается по глубине от наблюдаемой больше, чем при использовании списков Jor.-cor. и K18-cor. Возможно, список линий CN, включенный в LJQ, для литиевой бленды недостаточно полон, так как, согласно табл. 4—6, он содержит меньше линий CN, чем списки Jor.-cor. и K18-cor.

Полученные нами оценки содержания лития в атмосфере HD 100764 мы можем сравнить с результатами работы Заморы и др. [43]. В ней приведены предварительные результаты анализа химического состава 22 галактических R-звезд с измеренными параллаксами. К сожалению, в работе не приведен список звезд с указанием полученных содержаний лития, приведена только зависимость содержаний лития от эффективной температуры. Полученное нами значение содержания лития в HD 100764 $\lg N(Li) = 2$ хорошо ложится на эту зависимость.

Наши оценки содержаний лития в N-звездах AW Cyg и UX Dra типичны для звезд этого класса, что следует из работ [7, 12, 16]. Оценки из этих работ приведены в двух последних столбцах табл. 3. Видно, что для UX Dra наше значение $\lg N(Li)$ ниже оценки [16] на 0.3 dex, что находится в пределах погрешности $\pm(0.4—0.5)$ dex определения содержаний лития в углеродных гигантах. Возможно, наша оценка ниже из-за более полного учета атомного и молекулярного поглощения в наших синтетических спектрах, из-за небольших отличий в значениях таких параметров атмосферы UX Dra $[Fe/H]$, как $^{12}C/^{13}C$ и V_t , а также из-за использования нами других моделей атмосфер. Оценки же для AW Cyg и UX Dra, приведенные в обширном каталоге [12], существенно выше, чем наши — на 2.6 dex для AW Cyg и 1.7 dex для UX Dra. Отметим, что для всех 26 N-звезд с эволюционными содержаниями лития, которые исследовались также в работе [16], оценки в работе

[12] выше, чем в [16]. Диапазон отличий составляет 0.2...3.0 dex, средняя величина 0.45 dex. Их причина не вполне понятна.

Мы получили, что при использовании трех рассмотренных вариантов списков молекулярных линий оценки содержаний лития отличаются не более чем на 0.2 dex. Рассмотрение состава литиевой бленды, однако, показывает, что вклад разных компонентов поглощения при использовании разных списков молекулярных линий в количественном отношении заметно отличается. Изменяется и коэффициент p , определяющий уровень континуума в наблюдаемом спектре ($p = 1.34...1.40$ для случая нашего спектра UX Dra, что указано на рис. 5). Видимо, происходит взаимная компенсация этих факторов, когда однотипно совмещаются наблюдаемый и синтетический спектры. Стабильность оценок также является следствием того, что в спектрах не только богатых литием, но и обычных углеродных гигантов резонансная линия лития достаточно сильна (рис. 5 *a, б, в*), так что некоторые различия в учете блендирующих молекулярных линий мало влияют на оценки содержания лития. В спектре звезды HD 100764 линия лития значительно слабее, и различия в списках линий, как видно из табл. 3, больше сказались на оценках содержания лития.

В заключение отметим, что основные списки молекулярных линий, использовавшиеся в настоящей работе — список Йоргенсена SCAN-CN [21], списки Керси [36, 37], списки Куруца [28], лабораторный список линий CN А-Х Дэвис и Филлипса [13] были получены достаточно давно (более 15 лет назад). Более совершенные списки линий CN и C₂ нам неизвестны. Очень актуально создание новой унифицированной и удобной в пользовании базы молекулярных данных.

Авторы благодарят А. В. Бондаря за предоставленные данные наблюдений спектра HD 100764, С. Г. Сергеева за возможность использования программного пакета SPE и А. В. Шаврину за предоставленный список атомных линий Каstellи. Работа выполнялась в рамках исследований и при поддержке гранта FP7 POSTAGBin GALAXIES (No 269193), International Reseach Staff Exchange Scheme.

1. *Галазутдинов Г. А.* Система обработки эшеле-спектров DECH20. Нижний Архыз, 1994. 44 с. (Препринт / Специальная астрофизическая обсерватория; № 92).
2. *Мусаев Ф. А., Галазутдинов Г. А., Сергеев А. В. и др.* Кудэ-эшеле-спектрометр для 2-м телескопа на пике Терскол // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—**15**, № 3.—С. 282—287.
3. *Павленко Я. В.* Модели атмосфер красных гигантов // Астрон. журн.—2003.—**80**.—С. 67—74.
4. *Павленко Я. В., Яковина Л. А.* Модели атмосфер углеродных гигантов с высоким содержанием углерода // Кинематика и физика небес. тел.—2009.—**25**, № 6. С. 452—462.
5. *Яковина Л. А., Павленко Я. В.* Об определении содержания лития в атмосферах сверхбогатых литием углеродных звезд по резонансной и субординатным

- линиям Li I. II // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—**18**, № 2.—С. 99—113.
6. *Abia C., Boffin H. M. J., Isern J., Rebolo R.* IY Hya: a new super Li-rich carbon star // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**245**.—P. L1 1—4.
 7. *Abia C., Boffin H. M. J., Isern J., Rebolo R.* Lithium abundances in a flux-limited sample of galactic carbon stars // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**272**.—P. 455—464.
 8. *Abia C., Pavlenko Y., de Laverny P.* The formation of lithium lines in the atmospheres of super Li-rich AGB stars // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**351**.—P. 273—282.
 9. *Abia C., Dominguez I., Gallino R., et al.* s-Process nucleosynthesis in carbon stars // *Astrophys. J.*—2002.—**579**.—P. 817—831.
 10. *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.
 11. *Bernath P. F., Black J. H., Brault J.W.* The spectrum of magnesium hydride // *Astrophys. J.*—1985.—**298**.—P. 375—381.
 12. *Boffin H. M. J., Abia C., Isern J., Rebolo R.* A catalogue of Li abundances and equivalent widths in a sample of galactic C-stars // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1993.—**102**.—P. 361—380.
 13. *Davis S. P., Phillips J. G.* The red system of the CN molecule. — Berkeley: University of California Press, 1963.
 14. *de Laverny P., Abia C., Dominguez I., et al.* Chemical analysis of carbon stars in the Local Group: I. The Small Magellanic Cloud and the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**446**.—P. 1107—1118. — arXiv:astro-ph/0510131v1.
 15. *de Laverny P., Gustafsson B.* On the determination of carbon isotopic ratios in cool carbon stars // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**332**.—P. 661—671.
 16. *Denn G. R., Luck R. E., Lambert D. L.* Lithium abundances in carbon stars // *Astrophys. J.*—1991.—**377**.—P. 657—668.
 17. *Dominy J. F.* The chemical composition and evolutionary state of the early R stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1984.—**55**.—P. 27—43.
 18. *Grevesse N., Sauval A. J., Blomme R.* Solar abundances of C, N and O // *IAUS.*—1994.—**154**.—P. 539—541.
 19. *Hinkle K., Wallace L., Valenti J., Harmer D.* Visible and near infrared atlas of the Arcturus spectrum 3727—9300 Å. — San Francisco: ASP, 2000.
 20. *Huang Y., Barts S. A., Halpern J. B.* Heat of formation of the cyanogen radical // *J. Phys. Chem.*—1992.—**96**.—P. 425.
 21. *Jorgensen U. G., Larsson M.* Molecular opacities of astrophysical interest: the A² — X² system of CN // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**238**.—P. 424—434.
 22. *Kipper T.* Carbon stars in the UVES Paranal observatory project // *Baltic Astronomy.*—2004.—**13**.—P. 573—580.
 23. *Kotlar A. J.* Ph. D. thesis. Massachusetts Institute of Technology, 1978.
 24. *Kotlar A. J., Field R. W., Steinfeld J. I.* Analysis of perturbations in the A²O-X²OJ⁺ “Red” system of CN // *J. Mol. Spectrosc.*—1980.—**80**.—P. 86.
 25. *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.
 26. *Kurucz R. L., Peytremann E.* A table of semiempirical gf-values // *SAO Spec. Rept.*—1975.—N 362, part 1.
 27. *Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* Solar flux atlas from 296 to 1300 nm

- // National Solar Observatory Atlas. Cambridge: Harvard Univ.—1984.—N 1.—239 p.
28. *Kurucz R. L.* Cambridge, MA: Smithsonian. Astrophys. Obs., 1993. CD-ROM N 1 23.
29. *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.
30. *Lambert D. L., McWilliam A., Smith V. V.* The chemical composition of blue horizontal branch stars in M4 and NGC 6397 // *Astrophys. J.*—1992.—**386**.—P. 685—694.
31. *Lambert D. L., Smith V. V., Heath J.* Lithium in the barium stars // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1993.—**105**.—P. 568—573.
32. *Lebre A., de Laverny P., de Medeiros J. R., et al.* Lithium and rotation on the subgiant branch. I. Observations and spectral analysis // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**345**.—P. 936—942.
33. *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.
34. *Peterson R. C., Dalle Ore C. M., Kurucz R. L.* The nonsolar abundance ratios of Arcturus deduced from spectrum synthesis // *Astrophys. J.*—1993.—**404**.—P. 333—347.
35. *Plez B., Smith V. V., Lambert D. L.* Lithium abundances and other clues to envelope burning in Small Magellanic Cloud asymptotic giant branch stars // *Astrophys. J.*—1993.—**418**.—P. 812—831.
36. *Querci F., Querci M., Kunde V. G.* Opacity probability distribution functions for electronic systems of CN and C₂ molecules including their stellar isotopic forms // *Astron. and Astrophys.*—1971.—**15**.—P. 256—274.
37. *Querci F., Querci M., Tsuji T.* Model atmospheres for C type stars // *Astron. and Astrophys.*—1974.—**31**.—P. 265—282.
38. *Reddy B. E., Lambert D. L., Laws C., et al.* A search for ⁶Li in stars with planets // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**335**.—P. 1005—1016.
39. *Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Pavlenko Ya. V., et al.* The spectrum of the roAp star HD 101065 (Przybylski's star) in the Li I 6708 Å region // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**409**.—P. 707—713.
40. *Smith V. V., Plez B., Lambert D. L.* A survey of lithium in the red giants of the Magellanic Clouds // *Astrophys. J.*—1995.—**441**.—P. 735—746.
41. *Tsuji T.* Molecular abundances in stellar atmospheres. II // *Astron. and Astrophys.*—1973.—**23**.—P. 411—431.
42. *Urdahl R. S., Bao Y., Jackson W. M.* An experimental determination of the heat of formation of C₂ and the C—H bond dissociation energy in C₂H // *Chem. Phys. Lett.*—1991.—**178**.—P. 425.
43. *Zamora O., Abia C., Plez B., Domingues I.* The chemical composition of R-stars // *Mem. Soc. astron. ital.*—2006.—**77**.—P. 973—978.

Поступила в редакцию 05.05.10