

УДК 524.316.7.082

Л. А. Яковина, Я. В. Павленко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев
03680, Киев, МСП, ул. Академика Заболотного, 27

Об определении содержания лития в атмосферах сверхбогатых литием углеродных звезд по резонансной и субординатным линиям Li I. I

Семь линий Li I в оптическом и ближнем ИК-диапазоне рассмотрены как индикаторы содержания лития в атмосферах сверхбогатых литием холодных углеродных звезд. Резонансная линия Li I λ 670.8 нм крайне чувствительна к содержаниям лития при $\lg N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$ в основном за счет высокой чувствительности к $\lg N(\text{Li})$ интенсивности ее крыльев. Это требует высокой точности их расчета. Субординатные линии Li I λ 610.4 нм и λ 812.6 нм при $\lg N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$ насыщены и показывают скорее слабую зависимость от содержания лития. Более слабые субординатные линии Li I $\lambda\lambda$ 497.2, 460.3, 427.3 и 413.3 нм потенциально могут быть хорошими индикаторами содержания лития при $\lg N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$. Однако реально для определения содержания лития в звездах с нормальной металличностью можно использовать только линию Li I λ 497.2 нм из-за сильного блендирования остальных трех линий и наличия в спектрах большинства углеродных гигантов «фиолетовой депрессии».

ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЛІТІЮ В АТМОСФЕРАХ НАДБАГАТИХ ЛІТІЄМ ВУГЛЕЦЕВИХ ЗІР ЗА РЕЗОНАНСНОЮ ТА СУБОРДИНАТНИМИ ЛІНІЯМИ Li I. I, Яковина Л. Я., Павленко Я. В. — Сім ліній Li I в оптичному та ближньому ІЧ-діапазоні розглянуті як індикатори вмісту літію у атмосферах надбагатих літієм холодних вуглецевих зір. Резонансна лінія Li I λ 670.8 нм вкрай чутлива до вмісту літію при $\lg N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$ в основному за рахунок високої чутливості до $\lg N(\text{Li})$ інтенсивності її крил. Це вимагає високої точності їхнього розрахунку. Субординатні лінії Li I λ 610.4 нм та λ 812.6 нм при $\lg N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$ насичені і показують скоріше слабку залежність від вмісту літію. Слабші субординатні лінії Li I $\lambda\lambda$ 497.2, 460.3, 427.3 та 413.3 нм потенційно можуть бути добрими індикаторами вмісту літію при $\lg N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$. Але реально для визначення вмісту літію в зорях з нормальною металичністю можна використовувати лише лінію Li I λ 497.2 нм через сильне блендування решти трьох ліній та наявності у спектрах більшості вуглецевих гігантів «фіолетової депресії».

ON THE LITHIUM ABUNDANCE DETERMINATION IN THE ATMOSPHERES OF SUPER-Li-RICH CARBON STARS USING THE RESONANCE AND SUBORDINATE Li I LINES. I, by Yakovina L. A., Pavlenko Ya. V. — Seven Li I lines in the optical and near IR region are considered as lithium abundance indicators in the atmospheres of super-Li-rich cool carbon stars. The resonance Li I line λ 670.8 nm is extremely sensitive to the lithium abundance at $\log N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$ due to the sensitivity to $\log N(\text{Li})$ of the line wings mainly. This requires a high accuracy of their calculations. The subordinate Li I lines λ 610.4 and λ 812.6 nm are saturated and show a rather weak dependence on $\log N(\text{Li})$ in the range 4.0...5.0. Weaker subordinate Li I lines λ 497.2, 460.3, 427.3, and 413.3 nm can be potentially good lithium abundance indicators at $\log N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$. However, only the line Li I λ 497.2 nm can be used for lithium abundance determinations in stars with normal metallicities because of strong blending of three other lines and a «violet depression» in the spectra of the majority of carbon giants.

ВВЕДЕНИЕ

Определение содержания лития в атмосферах звезд различных типов представляет большой интерес как для анализа процессов нуклеосинтеза, так и для тестирования существующих представлений о некоторых деталях звездной эволюции. Большой интерес с этой точки зрения представляют богатые литием холодные углеродные звезды, так как их первичный литий выгорел на более ранних стадиях эволюции, а наблюдающийся литий (${}^7\text{Li}$) — новообразовавшийся. Считается, что этот литий образуется за счет механизма выноса ${}^7\text{Be}$. Последний образуется в звездах асимптотической ветви гигантов (АВГ) на стадии гелиевой вспышки в реакции ${}^7\text{Be}(e^-, \nu){}^7\text{Li}$, протекающей в горячей конвективной области звезды [13, 22]. Однако не все выводы теории пока количественно согласуются с наблюдениями. Кроме того, холодные углеродные звезды — это объекты, постоянно теряющие массу и обогащающие литием межзвездную среду. Потому представляет космогонический интерес возможно более точная оценка вклада богатых (БЛ, $\lg N(\text{Li}) > 1.0$) и сверхбогатых литием (СБЛ, $\lg N(\text{Li}) > 4.0$) углеродных звезд в галактическое содержание лития [11]. С помощью известных на сегодняшний день механизмов разрушения и производства лития невозможно интерпретировать ни наблюдающееся космическое содержание лития ($\lg N(\text{Li}) = 3.3$), ни эволюцию содержания лития в Галактике. Исследование звезд населения II, а также расчеты «стандартных» моделей Большого Взрыва приводят к тому, что первичное, догалактическое содержание лития составляло $\lg N(\text{Li}) = 2.2$ [4]. Эти обстоятельства делают крайне актуальной задачу определения содержания лития в атмосферах холодных углеродных звезд.

В спектрах углеродных СБЛ-звезд очень сильна резонансная линия Li I λ 670.8 нм, и на сегодняшний день подавляющее большинство оценок содержаний лития в этих звездах сделано по этой линии. Она крайне чувствительна к содержанию лития, однако из-за ее насыщения оценка производится не по ядру, а по крыльям линии. Ядро же, формирующееся уже в оболочке углеродной звезды, не описывается теоретически достаточно точно. Все это вносит неуверенность в оценки содержания лития по линии λ 670.8 нм. Между тем несколько сильных субординатных линии Li I расположены в видимой и ближней ИК-области спектра, и они тоже могут быть использованы для определения содержания лития. Эти линии принадлежат серии, образующейся за счет переходов с уровня $2p$. Следующая серия — переходы с уровня $3p$ — расположена в ИК-области. Все оптиче-

ские линии Li I в большей или меньшей степени блендированы, к тому же в спектрах большинства холодных углеродных звезд наблюдается «фиолетовая депрессия» — ослабление излучения звезды на длинах волн $\lambda < 450$ нм. Ее возникновение объясняют поглощением излучения во внешних холодных слоях атмосфер многоатомными молекулами C_3 и SiC_2 и их конденсатами [1]. Очевидно, вопрос о пригодности каждой линии лития для определения его содержания и о точности оценки $lgN(Li)$ по данной линии требует отдельного рассмотрения. Отметим также, что для разных содержаний лития лучшими его индикаторами должны быть разные линии лития.

Проблемы определения содержания лития в углеродных звездах с использованием субординатных линий Li I уже рассматривались. В работе [21] для определения содержания лития в атмосферах нескольких углеродных звезд АВГ в Малом Магеллановом Облаке кроме резонансной линии Li I использовалась субординатная линия Li I λ 812.6 нм. В работе [12] проанализированы линии Li I $\lambda\lambda$ 460.3, 610.4, 670.8 и 812.6 нм, и по трем из них сделаны оценки ЛТР- и НЛТР-содержаний лития в атмосферах трех углеродных СБЛ-звезд (WZ Cas, WX Cyg и IY Hya). Вопрос о возможности использования линии Li I λ 460.3 нм остался открытым.

Ниже рассматривается возможность использования для такой задачи резонансной (λ 670.8 нм) и шести субординатных линий Li I ($\lambda\lambda$ 812.6, 610.4, 497.2, 460.3, 427.3, 413.3 нм). Рассмотренные субординатные линии являются наиболее сильными в серии переходов с уровня $2p$. Мы оценили преимущества и недостатки указанных линий Li I как индикаторов содержания лития в углеродных СБЛ-звездах, для чего рассмотрели как сами линии, так и их блендирование соседними атомными линиями и молекулярными полосами. Расчеты произведены с моделью атмосферы, выбранной для самой яркой и наиболее изученной углеродной СБЛ-звезды WZ Cas (C9, 2J).

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ И ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Синтетические спектры углеродных звезд и кривые роста линий лития рассчитывались в рамках приближения ЛТР по программе WITA6 [6]. Решалась система уравнений ионизационно-диссоциативного равновесия для смеси атомов, ионов и около 100 молекул (в том числе и многоатомных). Большинство потенциалов диссоциации молекул, а также постоянные диссоциативного равновесия брались из [23]. Уравнение переноса излучения решалось для случая плоскопараллельной среды. Профили отдельных линий описывались функцией Фойгта. При расчете постоянной затухания учитывалось естественное затухание, уширение Ван-дер-Ваальса и Штарка [8]. В расчетах использовалась система источников непрозрачности в континууме, ориентированная на случай атмосфер, богатых углеродом [9]. Связанно-свободное поглощение кислородом, углеродом и азотом рассчитывалось с использованием данных Хофзаесса [16].

Нами был предусмотрен ввод дополнительного непрерывного поглощения для учета неотожествленных источников непрозрачности. Это делалось с помощью параметра k , увеличивающего коэффициент непрерывного поглощения в заданное число раз. Более подробно этот подход изложен, например, в работе [10].

Для сравнения с наблюдениями синтетические спектры сворачивались с гауссианой, которая использовалась для моделирования влияния инструментального уширения и макротурбуленции.

В программе WITA6 кроме расчета детальных спектров с использованием списков вращательных линий молекул предусмотрен расчет профилей

молекулярных полос в приближении полностью перекрывающихся линий (JOLA — Just Overlapping Approximation), т. е. без учета вращательной структуры полосы. Это сделано на основании алгоритма, изложенного в работе [5]. Спектроскопические постоянные, необходимые для этих расчетов, взяты из монографий [2, 3, 17]. Комплекс программ для расчетов спектров в приближении JOLA дополнен нами программой ISOTOPC, позволяющей рассчитывать необходимые молекулярные постоянные для изотопных молекул по значениям постоянных для основного изотопа. Алгоритм и расчетные формулы для программы ISOTOPC взяты из работы [15].

Расчеты проводились с одной из моделей атмосфер, описанных в работе [14] и использованных в работе [12]. Мы выбрали эту модель для анализа самой яркой и хорошо изученной углеродной СБЛ-звезды WZ Cas из сопоставления синтетических и наблюдаемых спектров WZ Cas, предоставленных нам К. Абиа. Ее параметры приведены в табл. 1.

При расчете синтетических спектров WZ Cas, как и в работе [12], были использованы модельные содержания кислорода и азота и близкие к модельному содержания углерода. Наши оценки $\lg N(C)$ по наблюдаемому спектру WZ Cas оказались несколько выше модельных, но не более чем на 0.004 dex. При этом значение C/O лучше согласуется с оценкой Ламберта и др. [19] (C/O = 1.010). Значения $^{12}C/^{13}C$ для WZ Cas определялись в ряде работ других исследователей. Они хорошо согласуются между собой и близки к значению $^{12}C/^{13}C = 5$ [12], которое мы принимаем. Величину микротурбулентной скорости $V_t = 2.5$ км/с мы взяли из работы [12].

Параметры рассмотренных в настоящей работе линий Li I приведены в табл. 2 (данные VALD [20], источник — «Bell light: Li to O»).

Для расчета теоретических спектров в окрестностях этих линий мы формировали компилятивные списки линий, используя за основу списки

Таблица 1. Параметры модели атмосферы, выбранной для WZ Cas

$T_{\text{эф}}/\lg g/\mu$	C/O	$\lg N(C)$	$\lg N(N)$	$\lg N(O)$
3000/0/0	1.007	8.923	7.99	8.92

Таблица 2. Параметры рассмотренных линий Li I

λ , нм	$\lg gf$	E_i , эВ	Переход ($i \rightarrow k$)
812.6231	-0.665	1.848	2p 2P — 3s 2S
812.6452	-0.365	1.848	2p 2P — 3s 2S
670.7761	-0.009	0.000	2s 2S — 2p 2P
670.7912	-0.309	0.000	2s 2S — 2p 2P
610.3538	0.101	1.848	2p 2P — 3d 2D
610.3649	0.361	1.848	2p 2P — 3d 2D
610.3664	-0.599	1.848	2p 2P — 3d 2D
497.1661	-1.600	1.848	2p 2P — 4s 2S
497.1744	-1.300	1.848	2p 2P — 4s 2S
460.2826	-0.613	1.848	2p 2P — 4d 2D
460.2894	-0.353	1.848	2p 2P — 4d 2D
460.2897	-1.313	1.848	2p 2P — 4d 2D
427.3065	-2.074	1.848	2p 2P — 5s 2S
427.3127	-1.774	1.848	2p 2P — 5s 2S
413.2562	-1.037	1.848	2p 2P — 5d 2D
413.2618	-0.777	1.848	2p 2P — 5d 2D
413.2619	-1.737	1.848	2p 2P — 5d 2D

атомных линий VALD [20], списки молекулярных линий Куруца [18] с CD-ROM N 18 и списки, с которыми производились расчеты Аби и др. в работе [12]. Более детальная информация о списках линий будет дана в следующих работах.

КРИВЫЕ РОСТА ЛИНИЙ ЛИТИЯ

На рис. 1 показаны ЛТР-кривые роста (КР) семи линий нейтрального лития, рассчитанные для модели атмосферы 3000/0/0, C/O = 1.007 (см. табл. 1). Содержание углерода было взято равным $\lg N(\text{C}) = 8.925$. Для всех линий принято $\kappa = 1$. Основные выводы этого раздела, однако, применимы к широкому классу углеродных звезд, учитывая результаты работы [12], где рассчитаны КР линий Li I $\lambda\lambda$ 460.3, 610.4, 670.8 и 812.6 нм для моделей из сетки [14] с параметрами $T_{\text{эф}} = 2500 \dots 3000$ К, C/O = 1.007...1.35, $\lg g = 0$, и показано, что форма кривых роста в указанных диапазонах параметров моделей атмосфер изменялась мало.

Из рис. 1 видно, что эквивалентные ширины разных линий лития при $\lg N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$ попадают на разные участки КР. Известно, что содержание элемента лучше всего определять по линиям поглощения умеренных интенсивностей, эквивалентные ширины которых попадают на линейный участок КР. В этом случае центральная интенсивность линии и ее эквивалентная ширина наиболее чувствительны к параметру $\lg N(\text{Li})$. Как следует из рис. 1, в случае резонансного дублета Li I λ 670.8 нм интервалу указанных значений $\lg N(\text{Li})$ соответствует участок КР, на котором доминируют эффекты затухания излучения. Этот участок КР характеризуется быстрым увеличением эквивалентной ширины линии при увеличении содержания лития из-за усиления ее крыльев (ядра насыщены). Следовательно, в этом случае важна точность расчета крыльев линий. Алгоритм расчета профилей линий изложен в работе [8], и здесь его мы не анализируем. Однако известно, что участок КР, соответствующий росту эквивалентной ширины за счет крыльев линии, является не лучшим для определения содержания элемента. Поэтому для определения содержания лития в углеродных СБЛ-звездах более всего подходят линии Li I $\lambda\lambda$ 497.2, 460.3, 427.3 и 413.3 нм, для которых значение $\lg N(\text{Li}) \approx 4$ попадает на линейные

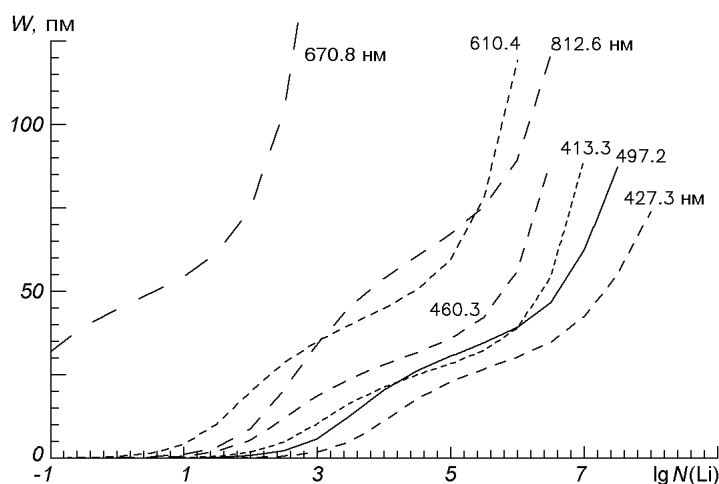


Рис. 1. Кривые роста семи линий Li I, рассчитанные для модели атмосферы 3000/0/0 (см. табл. 1), $\kappa = 1.0$, $\lg N(\text{C}) = 8.925$

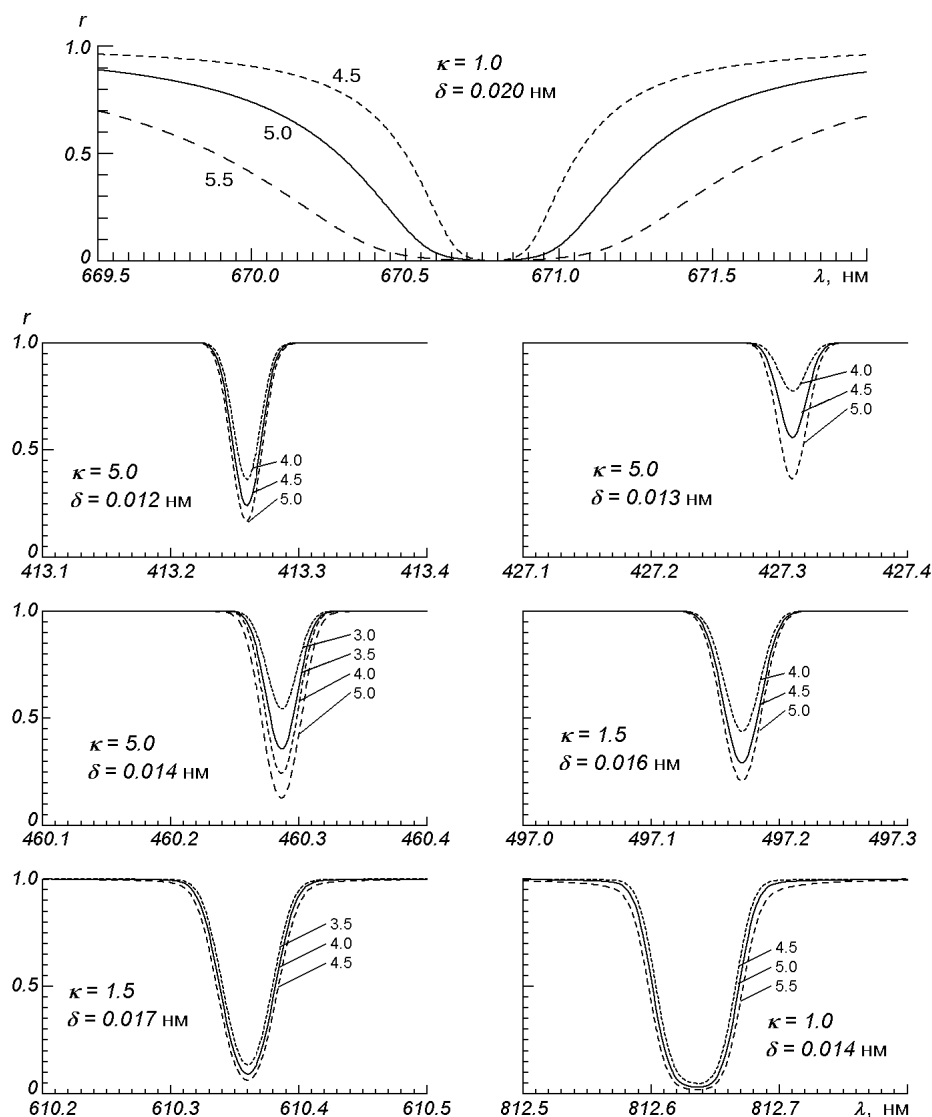


Рис. 2. Профили рассматриваемых линий Li I при разных значениях содержания лития $\lg N(\text{Li})$ (числа у кривых), рассчитанные с моделью атмосферы WZ Cas (см. табл. 1)

участки кривых роста. Линии λ 610.4 и λ 812.6 нм уже насыщены при содержаниях лития $\lg N(\text{Li}) \approx 4$, их интенсивности мало чувствительны к содержанию лития.

Эти выводы подтверждает рис. 2, на котором мы приводим рассчитанные профили семи рассматриваемых линий Li I при разных содержаниях лития. Расчеты произведены для тех значений κ , $\lg N(\text{C})$ и гауссова уширения δ , которые мы выбрали из сопоставления наблюдаемых и синтетических спектров WZ Cas в области каждой линии лития. Для линий Li I λ 413.3 и 427.3 нм (ввиду отсутствия наблюдений) взяты те же значения κ и $\lg N(\text{C})$, что и для линии λ 460.3 нм. Диапазоны $\lg N(\text{Li})$ согласованы с нашими оценками содержания лития по разным линиям Li I, рассмотрение которых выходит за рамки настоящей работы. Отметим, что наши вариации κ и $\lg N(\text{C})$ приводят к некоторому смещению кривых роста, однако при этом качественные выводы не изменяются. Например, кривая

роста линии Li I λ 460.3 нм, рассчитанная с $\kappa = 6$, при $\lg N(\text{Li}) = 2.5 \dots 5.5$ проходит на примерно 5 пм ниже кривой роста, рассчитанной с $\kappa = 1$.

БЛЕНДИРОВАНИЕ ЛИНИЙ ЛИТИЯ В СПЕКТРАХ УГЛЕРОДНЫХ ЗВЕЗД

Выше сделан вывод, что для определения содержания лития в углеродных СБЛ-звездах теоретически наиболее пригодны четыре линии Li I, расположенные в области $\lambda\lambda$ 400—500 нм. Однако в синей области спектра гораздо сильнее блендирование, чем в красной области. Это также влияет на качество индикаторов содержания лития.

Мы провели отдельный анализ блендирования линий лития атомными и молекулярными линиями. Анализ блендирования атомными линиями показал:

- Наиболее блендированны линии Li I $\lambda\lambda$ 413.3 и 427.3 нм. В этой области спектра много сильных линий элементов группы железа и довольно сильных линий тяжелых элементов. Среди линий, блендирующих линию Li I λ 427.3 нм, наиболее интенсивна линия Cr I λ 427.48 нм, принадлежащая резонансному триплету Cr I.
- Триплет Li I λ 460.3 нм более всего блендирует сильная линия Fe I λ 460.294 нм. Другие относительно сильные линии, блендирующие триплет Li I λ 460.3 нм, Zr I λ 460.257 нм, Gd I λ 460.293 нм и V I λ 460.297 нм. Чувствительность к содержанию лития бленды, включающей указанные линии и линию Li I λ 460.3 нм, очень низка до начала роста крыльев линии лития. Согласно расчетам по выбранной модели атмосферы (см. табл. 1), крылья у этой линии начинают увеличиваться при $\lg N(\text{Li}) = 6.0$.
- Дублет Li I λ 497.2 нм умеренно блендирован соседними атомными линиями. Наиболее интенсивные из них — Nb I λ 497.192 нм и Ce I λ 497.192 нм.
- Триплет Li I λ 610.4 нм находится в крыле бленды, образуемой сильными линиями Ca I λ 610.272 нм, Ti I λ 610.281 нм, а также линиями умеренной интенсивности Fe I λ 610.319 и λ 610.329 нм. Сильных линий тяжелых элементов в области рассматриваемой линии лития нет. При разрешениях, принимаемых нами (0.02 нм в красной области спектра), указанные блендирующие линии не затрудняют существенно анализ линии лития λ 610.4 нм. Отметим, однако, что в работе [7] у нас были проблемы с выбором сил осцилляторов линий Fe I λ 610.319 и λ 610.329 нм, блендирующих эту линию. Здесь мы используем такие же значения gf , как и в [7].
- В спектрах углеродных звезд при низких $T_{\text{эф}}$ в области резонансного дублета Li I λ 670.8 нм кроме тех линий, которые наблюдаются в спектрах К-М-гигантов [7], появляются сильные линии тяжелых элементов (Ba I λ 669.384 нм, Ce I λ 670.427 нм, La I λ 670.948 нм, Zr I λ 670.970 нм). Все эти линии блендируют крылья резонансного дублета лития, простирающиеся в спектрах углеродных СБЛ-звезд на несколько нанометров. Однако они существенно слабее резонансной линии Li I λ 670.8 нм.
- Дублет Li I λ 812.6 нм практически свободен от блендирования атомными линиями.

Вид молекулярных спектров холодных углеродных звезд в видимой и ближней ИК-областях спектра определяют в основном системы полос молекул C_2 и CN, однако менее существенный вклад дает и много других молекул. Молекулярные полосы образуют широкие бленды, протяженность которых обычно составляет несколько десятков нанометров. Мы рассчитали

Таблица 3. Системы полос двухатомных молекул, спектры которых рассчитывались в приближении JOLA

Молекула	Переход	Название системы	D_0 , эВ
C ₂	$d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$	Свана	6.156
C ₂	$A^1\Pi_u - X^1\Sigma^+_g$	Филлипа	6.156
CN	$B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$	Фиолетовая	7.89
CN	$A^2\Pi - X^2\Sigma^+$	Красная	7.89
CH	$A^2\Delta - X^2\Pi$		3.47
CH	$B^2\Sigma - X^2\Pi$		3.47
MgH	$A^2\Pi - X^2\Sigma^+$		2.00

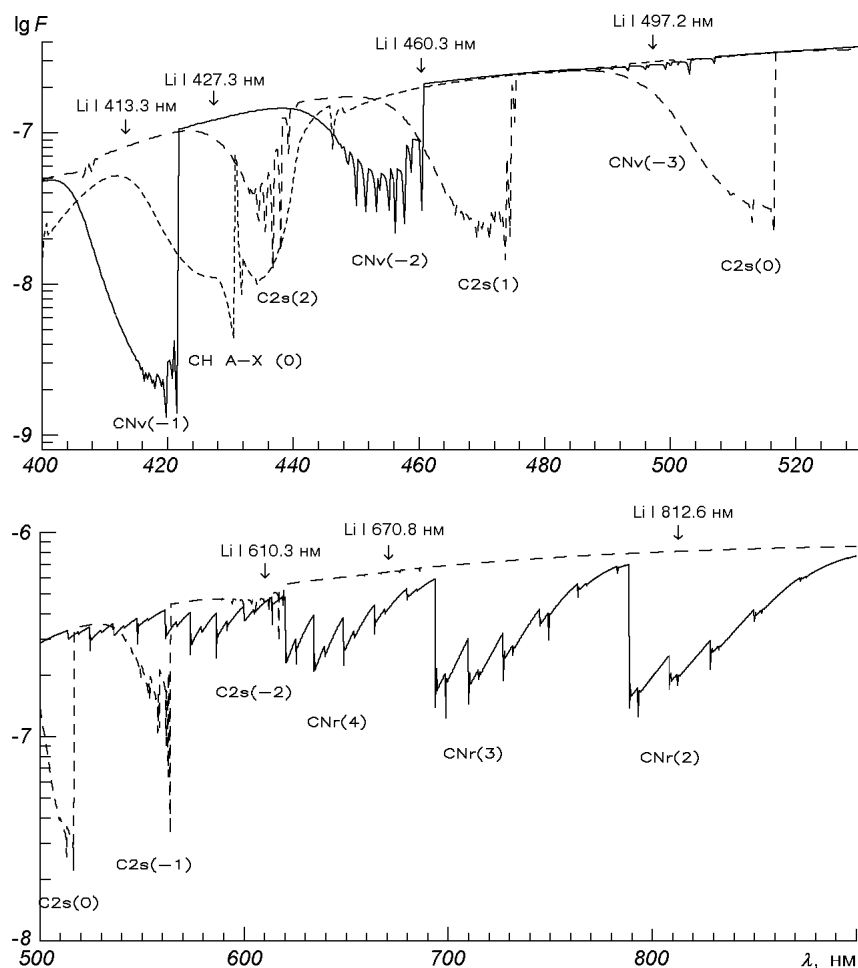


Рис. 3. Спектры наиболее интенсивных систем полос углеродсодержащих молекул, рассчитанные в приближении JOLA ($\kappa = 1$, $\lg N(C) = 8.925$). Показаны положения рассматриваемых линий лития. В идентификации молекулярных бленд в скобках указаны разности колебательных квантовых чисел $\Delta v = v' - v''$ для полос, формирующих данную бленду; CNv и CNr — фиолетовая и красная системы CN, C2s — система Свана C₂

с моделью атмосферы (см. табл. 1) профили систем полос молекул C₂, CN и CH, попадающих в диапазон $\lambda\lambda$ 400—900 нм, в приближение JOLA. Список анализировавшихся молекулярных систем приведен в табл. 3. Рассчитанные профили этих систем представлены на рис. 3. Указаны также

положения рассматриваемых линий Li I. Спектр системы A—X молекулы MgH, рассчитанный по данным для JOLA, имел явно завышенную интенсивность, и мы его на рис. 3 не приводим. Однако известно, что линии этой молекулы дают вклад в поглощение в рассматриваемом диапазоне [5].

Для более детального отождествления молекулярного спектра вблизи линий лития мы использовали списки вращательных молекулярных линий из банка данных Куруца [18, CD-ROM N 18].

Из наших расчетов следует:

- Линия λ 413.3 нм блендируется главным образом сильными полосами фиолетовой системы CN с $\Delta v = v' - v'' = -1$ (ближайшая полоса 5—6), а линия λ 427.3 нм попадает почти в центр G-полосы, формируемой в основном полосами с $\Delta v = 0$ системы A—X молекулы CN.
- Линия Li I λ 460.3 нм попадает в сложную область наложения полос с $\Delta v = -2$ фиолетовой системы CN и полос с $\Delta v = +1$ системы Свана молекулы C_2 . В непосредственной близости от линии лития (на $\lambda \approx 460.6$ нм) находится голова полосы 0—2 фиолетовой системы ^{12}CN с оттенением в коротковолновую сторону, так что она блендирует линию Li I λ 460.3 нм. Линии гидридов MgH и SiH дают некоторый вклад в поглощение в области линии λ 460.3 нм, однако данные для анализа вклада этих молекул пока недостаточно точны.
- Линии Li I λ 497.2 и λ 610.4 нм попадают в области относительно слабого поглощения молекулой CN. Они также слабо блендируются полосами Свана молекулы C_2 . В спектре C_2 в области λ 610.4 нм, кроме относительно сильных полос Свана с $\Delta v = -2$ ($v', v'' < 10$), есть много слабых полос Свана с высокими значениями колебательных квантовых чисел, а в спектре красной системы CN много линий полос с $v', v'' < 10$, но с высокими значениями вращательных квантовых чисел. Наиболее интенсивно линию Li I λ 610.4 нм блендирует полоса 1—3 системы $d-a$ изотопной молекулы $^{12}C^{13}C$, голова которой расположена на длине волны $\lambda \approx 610.7$ нм.
- В областях линий Li I λ 670.8 и λ 812.6 нм основным молекулярным вкладчиком является красная система CN. Линию Li I λ 670.8 нм блендируют в основном полосы этой системы с $\Delta v = 4$, основные: 4—0, 5—1, 6—2, 7—3. В области линии Li I λ 812.6 нм спектр красной системы CN формируется наложением большого количества полос, наиболее сильные из них: 2—0, 3—1, 4—0, 4—8, 5—1, 8—5, 9—4, 9—6. В рассматриваемых областях спектра присутствуют также полосы системы Филлипса молекулы C_2 , однако они на рис. 3 не приведены, так как значительно слабее полос красной системы CN.

ЛИНИИ Li I КАК ИНДИКАТОРЫ СОДЕРЖАНИЯ ЛИТИЯ В АТМОСФЕРАХ УГЛЕРОДНЫХ СБЛ-ЗВЕЗД

На рис. 4 показана чувствительность к содержанию лития семи бленд, включающих рассмотренные линии лития. Синтетические спектры в окрестностях линий лития рассчитаны с помощью составленных нами списков атомных и молекулярных линий (см. краткое описание выше). Для линий Li I λ 413.3 и λ 427.3 нм рисунки получены без учета молекулярного поглощения, так что чувствительность этих линий к содержанию лития завышена. Расчеты всех бленд мы произвели с теми же значениями k , $\lg N(C)$ и гауссова уширения δ и для тех же диапазонов $\lg N(Li)$, что и расчеты линий лития без блендирующих линий (см. рис. 2).

Из рис. 2 и 4 видно, что блендирование существенно сужает возможности использования субординатных линий для определения содержания Li I.

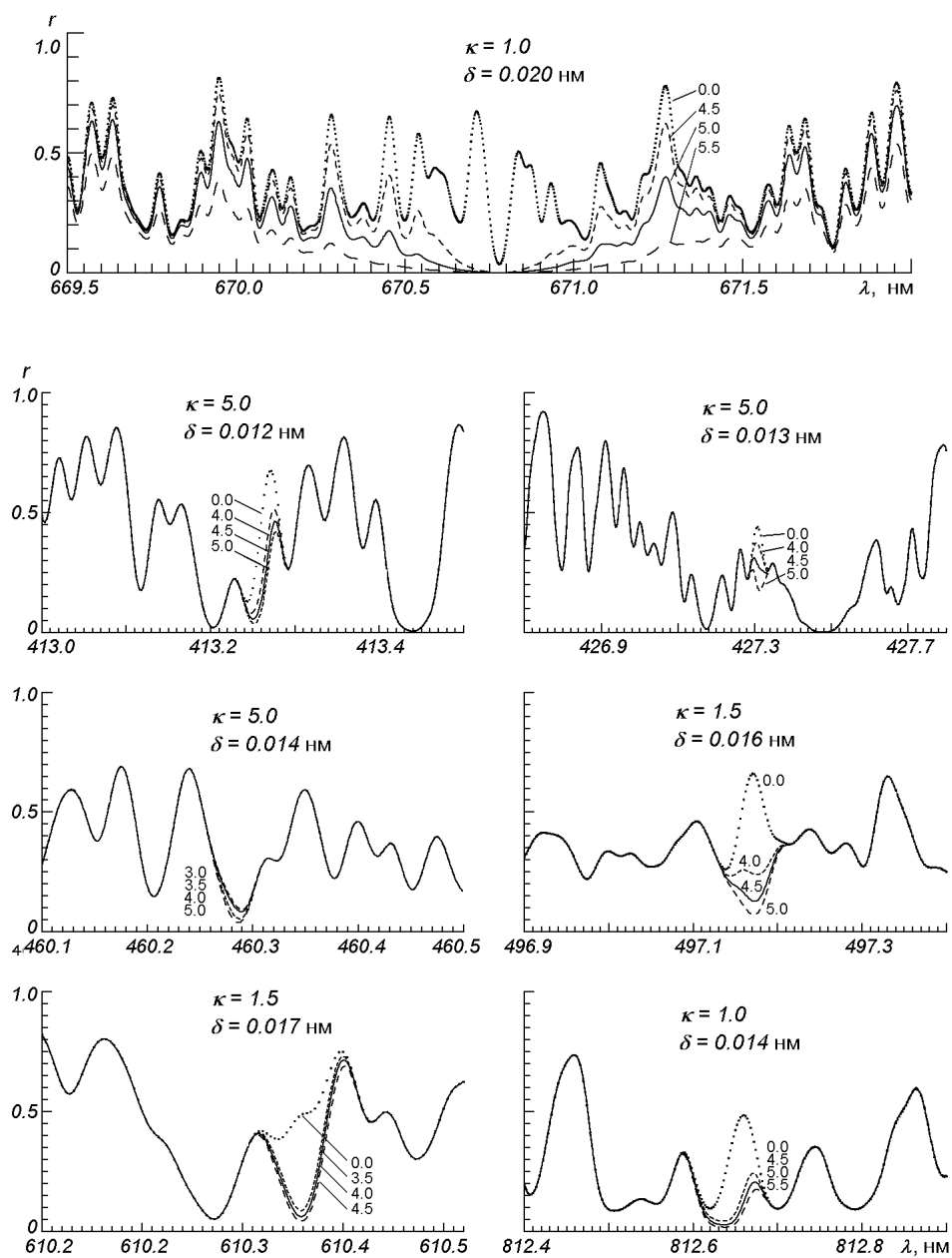


Рис. 4. Синтетические спектры вблизи рассматриваемых линий Li I при разных содержаниях лития $\lg N(\text{Li})$ (числа у кривых), рассчитанные с моделью атмосферы WZ Cas (см. табл. 1); $\lg N(\text{C}) = 8.93$

На основании всех проведенных в настоящей работе расчетов мы можем следующим образом оценить рассмотренные линии Li I как индикаторы содержания лития:

- Интенсивность резонансной линии Li I λ 670.8 нм намного превосходит интенсивности всех субординатных линий лития. Крылья резонансной линии и при наличии блендирования высоко чувствительны к содержанию лития при $\lg N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$, хотя блендирование несколько снижает эту чувствительность. Оценки по резонансной линии Li I

λ 670.8 нм в принципе можно сделать с высокой внутренней точностью, однако проблема состоит в оценке абсолютной возможной погрешности определения содержания лития по этой линии.

- Линии Li I λ 610.4 нм и λ 812.6 нм — самые интенсивные из субординатных линий лития и менее блендированные, чем линии лития в синей области. Однако в спектрах углеродных СБЛ-звезд они насыщены, вследствие чего их чувствительность к содержанию лития довольно слабая. К тому же область линии Li I λ 812.6 нм отягощена теллурическим поглощением. Так что линии Li I λ 812.6 нм и λ 610.4 нм являются не лучшими индикаторами содержания лития в углеродных СБЛ-звездах.
- Линия Li I λ 497.2 нм обладает высокой чувствительностью к содержанию лития. Она и линия Li I λ 610.4 нм — наименее блендированные из рассмотренных линий лития. Потому мы считаем линию Li I λ 497.2 нм самой перспективной среди субординатных линий Li I для определения содержания лития в углеродных СБЛ-звездах.
- Линия Li I λ 460.3 нм — третья по интенсивности (после линий Li I λ 812.6 и λ 610.4 нм) в серии переходов с уровня $2p$, т. е. достаточно сильна. Вместе с тем она обладает хорошей чувствительностью к содержанию лития. Однако она сильно блендирована (более всего линией Fe I λ 460.294 нм), и при содержаниях $\lg N(\text{Li}) = 4.0 \dots 5.0$ бленда с линией Li I λ 460.3 нм слабо чувствует содержание лития.

Рассмотрение линий Li I $\lambda\lambda$ 427.3 и 413.3 нм как индикаторов содержания лития в холодных углеродных СБЛ-звездах представило скорее теоретический, чем практический интерес, так как в спектрах большинства холодных углеродных звезд эти линии не видны из-за «фиолетовой депрессии». Однако мы хотели оценить все сильные линии Li I в диапазоне $\lambda\lambda = 400 \dots 820$ нм. Максимально чувствительна к $\lg N(\text{Li})$ линия λ 427.3 нм, самая слабая из рассмотренных субординатных линий Li I.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее интересным результатом настоящей работы мы считаем выделение субординатной линии Li I λ 497.2 нм в качестве хорошего индикатора содержания лития в холодных углеродных СБЛ-звездах.

Наш вывод, что линии λ 610.4 нм и λ 812.6 нм должны быть лучшими индикаторами содержания лития при $\lg N(\text{Li}) < 4$, подтверждают некоторые другие работы. Как уже упоминалось, линия Li I λ 812.6 нм успешно использовалась для определения содержания лития в атмосферах нескольких звезд АВГ Малого Магелланова Облака [21]. Почти во всех исследованных звездах содержания лития оказались близкими к $\lg N(\text{Li}) = 3$. В работе [7] для суперлигитиевого К-гиганта HD 9746 было получено содержание лития $\lg N(\text{Li}) = 3.6$, определенное как по резонансной линии Li I, так и по линии λ 610.4 нм. В случае этой звезды линия Li I λ 610.4 нм оказалась более чувствительной к содержанию лития, чем резонансная.

Попытка использовать линию Li I λ 460.3 нм для определения содержания лития в атмосфере WZ Cas впервые была предпринята Абиа и сотрудниками в работе [12]. Однако им не удалось сделать оценку $\lg N(\text{Li})$ из-за плохого описания синтетическим спектром наблюдаемого спектра WZ Cas в области линии Li I λ 460.3 нм. Так что вопрос о пригодности этой линии для указанной задачи остался открытым. Наш вывод состоит в том, что эта линия теоретически может быть индикатором содержания лития в углеродных СБЛ-звездах, но очень слабым. Чувствительность к содержанию лития рассчитанной бленды, включающей линию Li I λ 460.3 нм, невелика,

но она улучшается при введении в расчет синтетического спектра дополнительного непрерывного поглощения. Более благоприятная ситуация для этой линии лития ожидается для металлодефицитных звезд. Эти выводы, однако, требуют наблюдательной проверки.

В представленной работе мы впервые рассмотрели линии Li I $\lambda\lambda$ 427.3 и 413.3 нм в спектрах холодных углеродных СБЛ-звезд. Вследствие сильного блендирования этих линий и наличия «фиолетовой депрессии» при $\lambda < 450$ нм они вряд ли могут быть индикаторами содержания лития. Однако они показали высокую чувствительность к содержанию лития (особенно линия λ 427.3 нм) при содержаниях $\lg N(\text{Li}) = 4.0...5.0$ при отсутствии блендирования.

В общем случае для конкретной звезды представляют интерес оценки содержания лития по всем доступным линиям.

Результаты определения содержаний лития по разным линиям лития в атмосферах конкретных С-гигантов будут рассмотрены в следующих исследованиях.

Авторы считают приятным долгом поблагодарить д-ра Карлоса Абию (Университет Гранада, Испания) за предоставленные данные, создателей базы данных VALD за качественный и удобный сервис.

1. Алксне З., Алкснис А., Дзервитис У. Характеристики углеродных звезд Галактики. — Рига: Зинатне, 1983.—252 с.
2. Кузнецова Л. А., Кузьменко Н. У., Кузяков Е. А., Пластинин Я. А. Вероятности оптических переходов двухатомных молекул. — М.: Наука, 1980.—315 с.
3. Кузьменко Н. У., Кузнецова Л. А., Кузяков Е. А. Факторы Франка-Кондона двухатомных молекул. — М.: Изд-во МГУ, 1984.—342 с.
4. Любимков Л. С. Химический состав звезд. — Одесса: Астропринт, 1995.—323 с.
5. Нерсиян С. Е., Шаврина А. В., Яремчук А. А. Анализ молекулярного спектра N-звезд на основе моделей атмосфер // Астрофизика.—1989.—30.—С. 249—257.
6. Павленко Я. В. Линии лития в спектрах М-карликов — случай UX Tau C // Астрон. журн.—2000.—77, № 4.—С. 254—263.
7. Павленко Я. В., Саванов И. С., Яковина Л. А. Содержание лития в атмосфере К-гиганта HD 9746: ЛТР- и НЛТР-приближения // Астрон. журн.—1999.—76, № 10.—С. 766—774.
8. Павленко Я. В., Шаврина А. В. О постоянной затухания в атмосферах К-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1986.—2, № 6.—С. 54—56.
9. Павленко Я. В., Яковина Л. А. Модели объекта Сакураи (V4334 Sgr) // Астрон. журн.—2000.—77, № 4.—С. 243—253.
10. Яковина Л. А., Павленко Я. В. Полосы NH в ультрафиолетовой области спектра как индикаторы содержания азота в атмосферах холодных звезд // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 3.—С. 257—267.
11. Abia C., Isern J., Canal R. On the Li production by galactic C stars // Astron. and Astrophys.—1993.—275, N 1.—P. 96—100.
12. 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.
13. Cameron A. G. W., Fowler W. A. Lithium and the s-process in red-giant stars // Astrophys. J.—1971.—164, N 1.—P. 111—114.
14. Eriksson K., Gustafsson B., et al. Effects of HCN molecules in carbon star atmospheres // Astron. and Astrophys.—1984.—132, N 1.—P. 37—44.
15. Graybeal J. D. Diatomic vibrotor states and selection rules // Molecular spectroscopy. — New York: McGraw-Hill Book Company, 1987.—P. 306—309.
16. Hoffsaess D. Photoionization cross sections calculated by the scaled Thomas-Fermi method ($h\nu < 50$ eV) // Atomic data and nuclear data tables.—1985.—24.—P. 285—321.
17. Huber K. P., Herzberg G. Constants of diatomic molecules. — New York: Van Nostrand Reinolds, 1979.—716 p.
18. Kurucz R. L. Data Bank. — 1993—1994.—CD-ROM NN 1—22.
19. Lambert D. L., Gustafsson B., Eriksson K., Hinkle K. H. The chemical composition of carbon stars. I. Carbon, nitrogen and oxygen in cool carbon stars in the galactic disk // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1986.—62.—P. 373—425.
20. Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., et al. VALD: the Vienna atomic line data base // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1995.—112.—P. 525—535.

21. *Plez B., Smith V. V., Lambert D.* Lithium abundances and other clues to envelope burning in Small Magellanic Cloud asymptotic giant branch stars // *Astrophys. J.*—1993.—**418**, N 2.—P. 812—831.
22. *Sackmann I.-J., Boothroyd A. I.* The creation of super-rich lithium giants // *Astrophys. J.*—1992.—**392**, N 2.—P. L71—L74.
23. *Tsuji T.* Molecular abundances in stellar atmospheres. II. // *Astron. and Astrophys.*—1973.—**23**.—P. 411—431.

Поступила в редакцию 02.07.01