

УДК 524.316.082

Я. В. Павленко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27
ур@mao.kiev.ua

**Глубины формирования резонансных линий
поглощения лития в атмосферах звезд поздних
спектральных классов и коричневых карликов**

Предложена численная методика определения областей формирования линий поглощения в атмосферах звезд поздних спектральных классов и карликов субзвездных масс. Она основана на определении вклада отдельных слоев модели атмосферы звезды в формирование результирующей эквивалентной ширины спектральной линии. Метод применим и для случая формирования линий поглощения лития на фоне молекулярных полос. Рассмотрены случаи формирования линий лития в атмосфере Солнца (спектральный класс G2 V), красного гиганта из системы RS Oph (M2 III), C-гиганта WZ Cas (C6) и коричневого карлика LP944-20 (M9 V).

ГЛИБИНИ ФОРМУВАННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЛІНІЙ ПОГЛИНАННЯ ЛІТІЮ В АТМОСФЕРАХ ЗІР ПІЗНІХ СПЕКТРАЛЬНИХ КЛАСІВ ТА КОРИЧНЕВИХ КАРЛИКІВ, Павленко Я. В. — Пропонується числова методика визначення областей формування ліній поглинання в атмосферах зір пізніх спектральних класів та карликів субзоряних мас. Вона ґрунтується на визначенні вкладу окремих шарів моделі зоряної атмосфери у формування кінцевої еквівалентної ширини спектральної лінії. Метод можна застосувати і для випадку формування ліній поглинання літію на фоні молекулярних смуг. Розглянуто випадок формування ліній літію в атмосфері Сонця (спектральний клас G2 V), червоного гіганта із системи RS Oph (M2 III), C-гіганта WZ Cas (C6) і коричневого карлика LP944-20 (M9 V).

FORMATION DEPTHS OF THE LITHIUM RESONANCE LINES IN ATMOSPHERES OF LATE-TYPE STARS AND BROWN DWARFS, by Pavlenko Ya. V. — We propose a new method for the determination of depth formation of absorption lines in spectra of late-type stars and substellar

objects. Specifically, we estimate the contribution of any level of stellar atmosphere to the equivalent width of an absorption line. The method can be used for the case of the formation of atomic lines on the molecular band background. We consider the cases of the formation of the lithium resonance doublet lines in the atmospheres of the Sun, red giant (M2 III) from the of RS Oph system, C-giants WZ Cas (C6) and brown dwarf LP944-20 (M9 V).

ВВЕДЕНИЕ

Определение глубин формирования спектральных линий представляет интерес при решении многих задач количественного анализа звездных спектров. Эта задача широко обсуждалась в 1970—1980 гг. [11, 12, 16]. В ряде работ для оценки глубин формирования линий поглощения в звездной атмосфере использовалась эмиссионная функции вклада

$$F = S(\lambda) \exp(-\tau), \quad (1)$$

которая по сути является подынтегральной функцией в формуле для расчета интенсивности выходящего из атмосферы излучения. Для центра звездного диска

$$I = F d.$$

Однако позже было показано, что подход, основанный на анализе эмиссионных функций вклада, применим скорее всего к определению глубины формирования выходящего из атмосферы излучения в континууме, которая в большинстве случаев вовсе не совпадает с глубиной формирования спектральных линий поглощения. В частности, применение методики эмиссионных функций вклада приводит к заключению, что все слабые линии поглощения формируются достаточно глубоко в атмосфере на приблизительно одинаковой глубине.

Более реалистичные оценки глубин формирования линий получаются из анализа функции Унзольда — Пеккера [3, 23, 37]:

$$F_D = (S_c(\lambda) \exp(-\tau_c) d_c - S_l(\lambda) \exp(-\tau_l) \exp(-\tau_l)). \quad (2)$$

Здесь S_l, S_c, τ_l, τ_c — функции источников и оптические глубины в линиях и континууме соответственно. Магайн [16] получил практически такую же функцию при формальном решении уравнения переноса излучения для депрессии в линии. Таким образом, остаточная интенсивность в линии может быть записана в виде $r = F_D(\lambda) d_l$. Отметим, что приведенные выше формулы пригодны для анализа интенсивности излучения в центре диска звезды; однако они могут быть обобщены и на случай, когда наблюдаемый поток излучения формируется всем диском звезды.

Применение депрессионных функций вклада не вызывает проблем для одиночных линий поглощения, которые формируются на фо-

не «чистого» континуума. В то же время его сложно реализовать для определения глубин формирования блендированных линий поглощения, что характерно для звезд поздних спектральных классов, в которых представляющие для нас интерес линии поглощения образуются на фоне многочисленных линий поглощения других атомов и молекул.

Целью этой работы является разработка достаточно простого и эффективного численного алгоритма для определения глубин формирования линий поглощения атомов и молекул независимо от степени их блендирования и интенсивности. Мы ограничимся определением глубин формирования линий резонансного дублета лития в спектрах ряда космических объектов, особое внимание при этом мы уделим процедуре тестирования методики.

Содержание лития в атмосферах космических объектов может варьировать в диапазоне нескольких порядков в процессе их эволюции. Интерес к исследованию линий лития в звездных атмосферах во многом определяется именно зависимостью его содержания от параметров, определяющих эволюцию звезд в целом [25]. Помимо этого, содержание лития играет важную роль в наших представлениях о космологической картине современного состояния Вселенной [26].

У нейтрального атома лития потенциал ионизации сравнительно невелик ($E_{\text{ион}} = 5.4$ эВ), так что при фиксированном содержании лития в атмосферах интенсивность его резонансных линий увеличивается с понижением эффективной температуры звезды. Однако при этом усиливается и их блендирование линиями других атомов и молекул. В спектрах звезд спектральных классов М и С линии лития формируются на фоне сильных молекулярных полос, которые формируют для них своего рода псевдоконтинуум, что сильно усложняет процедуру численного анализа наблюдаемых спектров.

ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТОВ

Расчеты профилей отдельных линий поглощения и синтетических спектров производились программой WITA6 [19] в рамках классических предположений: ЛТР, гидростатическое равновесие в одномерной атмосфере без стоков и источников энергии. Эта программа использует традиционный набор источников непрозрачности в континууме из программы Куруца ATLAS9 [15]. Данные об атомных линиях брались из VALD [14], в работе использованы списки линий TiO и CN, рассчитанные Плезом [24] и Куруцем [15] соответственно. Профили отдельных линий поглощения описывались функцией Фойгта, параметры затухания брались из VALD или рассчитывались по формулам Унзольда [38]. Расчеты профилей отдельных линий поглощения и синтетических спектров производились с шагом по длине волны в 2 пм.

Ионизационно-диссоциативное равновесие (ИДР) рассчитывалось в рамках приближения локального термодинамического равновесия

весия для смеси примерно 100 наиболее обильных молекулярных соединений в атмосферах звезд поздних спектральных классов. При этом наборы учитываемых молекул отличались для случаев $O/C > 1$ и $O/C < 1$. Константы для расчета системы уравнений ионизационно-диссоциативного равновесия брались из работ [1, 36].

Данные о линиях поглощения. Ниже для тестирования нашей процедуры определения глубин формирования линий поглощения использовались две линии Fe I и Fe II, данные о которых (длины волн λ , силы осцилляторов gf , потенциалы возбуждения нижних уровней E соответствующих переходов и средние глубины формирования $\langle \lambda \rangle$ из работы [3], приведены в таблице. Там же приводятся данные о линиях резонансного дублета лития, которые представляют для нас основной интерес. Мы рассматриваем только линии резонансного дублета изотопа ${}^7\text{Li}$. Проблема исследования глубин образования линий второго по распространенности изотопа лития ${}^6\text{Li}$ представляет особый интерес и будет рассмотрена отдельно. Относительно резонансных линий лития представляется уместным заметить, что в большинстве случаев они формируют бленду, по суммарной интенсивности которой и судят о содержании лития в звездной атмосфере.

Функция вклада C_d . Численный алгоритм определения глубины формирования линии поглощения в звездной атмосфере основывается на оценке вклада конкретного слоя атмосферы звезды в формирование суммарной эквивалентной ширины линии поглощения. Процедура определения функции вклада C_d организована относительно просто:

— на i -м шаге расчетов предполагается, что поглощающие атомы имеются в атмосфере с 1-й до i -й точки по глубине. Естественно, эквивалентная ширина W , рассчитанная для такого модифицированного распределения поглощающих частиц с глубиной, будет меньше, чем рассчитанная для «полной» модели атмосферы;

— при продвижении вглубь атмосферы число поглощающих атомов на луче зрения будет увеличиваться. Соответственно будет увеличиваться теоретическая эквивалентная ширина (рис. 1). Вклад в W слоя атмосферы, расположенного между i -й и $i + 1$ -й точкой модели атмосферы, и определяет нашу функцию вклада $C_d(\lambda_i)$.

Следует отметить, что этот алгоритм можно использовать как для линий поглощения, рассчитанных в интенсивностях для центра звезды (случай представляет интерес для Солнца), так и для линий погло-

Параметры использованных атомных линий согласно данным [2]^a, [3]^b, [14]^c

Атом	λ , нм	gf	E	$\langle \lambda \rangle$
Fe I	525.020 ^a	1.288 ^a	0.12 ^a	-2.719 ^b
Fe II	608.410 ^a	1.09610 ^{-4a}	3.20 ^a	-0.925 ^b
Li I	670.7761 ^c	0.9795 ^c	0.00 ^c	-1.18 ^b
Li I	670.7912 ^c	0.4909 ^c	0.00 ^c	-1.18 ^b

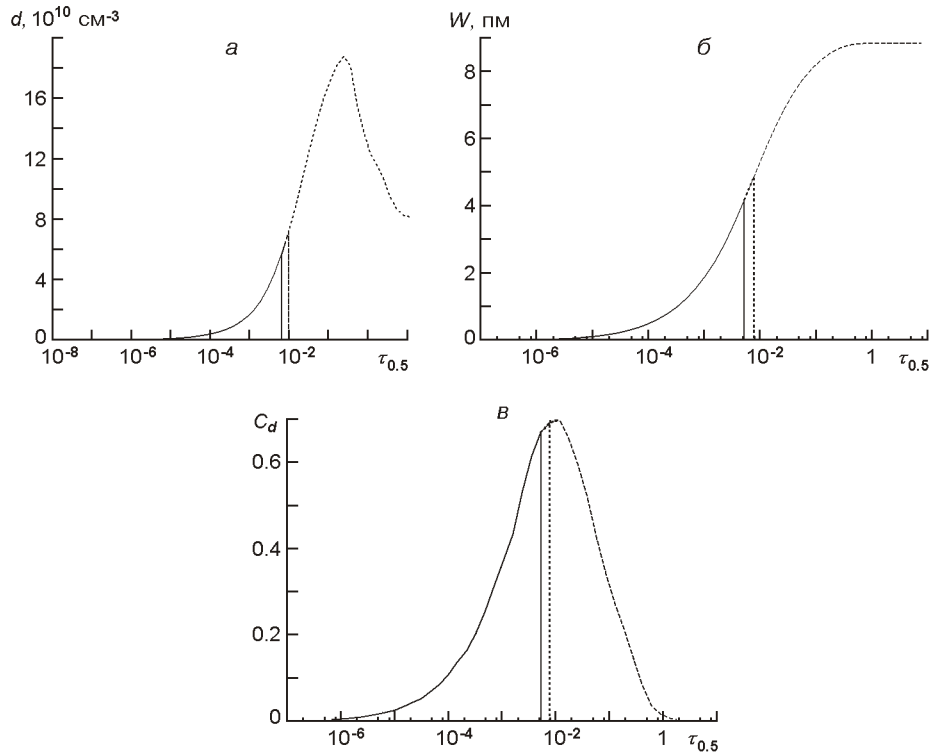


Рис. 1. Изменение концентрации N поглощающих частиц на i -м шаге расчетов (а), эквивалентной ширины W линии при таком изменении числа поглощающих атомов на луче зрения (б) и функция вклада C_d (в)

щения в спектрах, рассчитанных для всего диска звезды, т. е. в потоках. Он может применяться как к одиночным линиям, так и к блендированным спектрам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Тестирование методики: образование линий Fe I 525.020 нм и Fe II 608.410 нм. Атмосфера Солнца. Для тестирования нашей методики мы провели исследование глубины формирования линий поглощения нейтрального и ионизованного железа Fe I 525.020 нм и Fe II 608.410 нм (см. таблицу) в атмосфере Солнца. Глубины формирования этих линий с использованием эмиссионных и абсорбционных функций вклада были определены в работе Э. А. Гуртовенко и В. А. Шеминовой [3]. «Астрофизические» силы осцилляторов gf этих линий были определены в работе Э. А. Гуртовенко и Р. И. Костыка [2]; их значения и использовались в наших расчетах.

Заметим, что выбранные спектральные линии образуются вследствие поглощения атомами железа в разных стадиях ионизации. Они

формируются в различных областях атмосферы Солнца. В принципе образование линии поглощения Fe II 608.410 нм происходит в атмосфере звезды при больших температурах. Это подтверждается как расчетами [3], так и нашими прямыми расчетами.

В качестве модели атмосферы Солнца мы использовали HOLMU [13].

Концентрации атомов Fe I и ионов Fe II монотонно увеличиваются с глубиной в атмосфере (рис. 2, а), за исключением подфотосферных слоев $\tau_{0.5} > 1$, в которых концентрация Fe I начинает уменьшаться (здесь и далее $\tau_{0.5}$ — оптическая глубина в континууме $\lambda = 0.5$ мкм). На рис. 2, б показаны рассчитанные профили линий поглощения железа в остаточных интенсивностях $r(\lambda) = I^l / I^c$, где интенсивности излучения в частотах линии I^l и континууме I^c рассчитывались для центра Солнца.

Рассчитанные функции вклада C_d для линий поглощения Fe I 525.020 нм и Fe II 608.410 нм показаны на рис. 2, в. Как и ожидалось, области формирования линий Fe I и Fe II достаточно разнесены по глубине в атмосфере Солнца. При этом более слабая линия Fe II формируется глубже.

Обычно для характеристики формирования линий поглощения определяют некоторую среднюю глубину $\langle \tau \rangle$. В нашем случае эта величина определялась как

$$\langle \tau_{0.5} C_d \rangle / \langle C_d \rangle. \quad (3)$$

Для линий Fe I 525.020 нм и Fe II 608.410 нм получены значения $\lg \langle \tau \rangle = -2.719$ и -0.925 , показанные на рис. 2, в в точках В и С стрелками, направленными вниз. Для умеренно слабой линии Fe II 608.410 нм мы получили хорошее согласие с результатами [3], однако для более интенсивной линии поглощения Fe I 525.020 нм заметны отличия. Приведенные в таблице значения средних глубин формирования линий были получены для случая поглощения излучения в их ядрах. А ядра линий поглощения линий формируются на меньших глубинах, чем крылья. Это видно из рис. 2: определенная нами средняя глубина формирования линии поглощения Fe I 525.020 нм находится между глубинами формирования ядра линии и точки профиля линии, расположенной на половине ее интенсивности.

На рис. 2, в показано изменение с глубиной величины C_d , рассчитанной нами для ядер линий поглощения Fe I 525.020 нм и Fe II 608.410 нм. Расчеты проводились для центра линии и двух точек профиля, разнесенных на 0.02 (это шаг наших расчетов по длине волны). Отметим, что в целом функции вклада C_d , рассчитанные для ядер линий, сдвинуты в область меньших глубин. Этот эффект более заметен для более сильных линий поглощения. Значения средних глубин $\langle \tau \rangle$ формирования ядер линий поглощения Fe I 525.020 нм и Fe II 608.410 нм составили 0.0015 и 0.065 (точки А и D для линий погло-

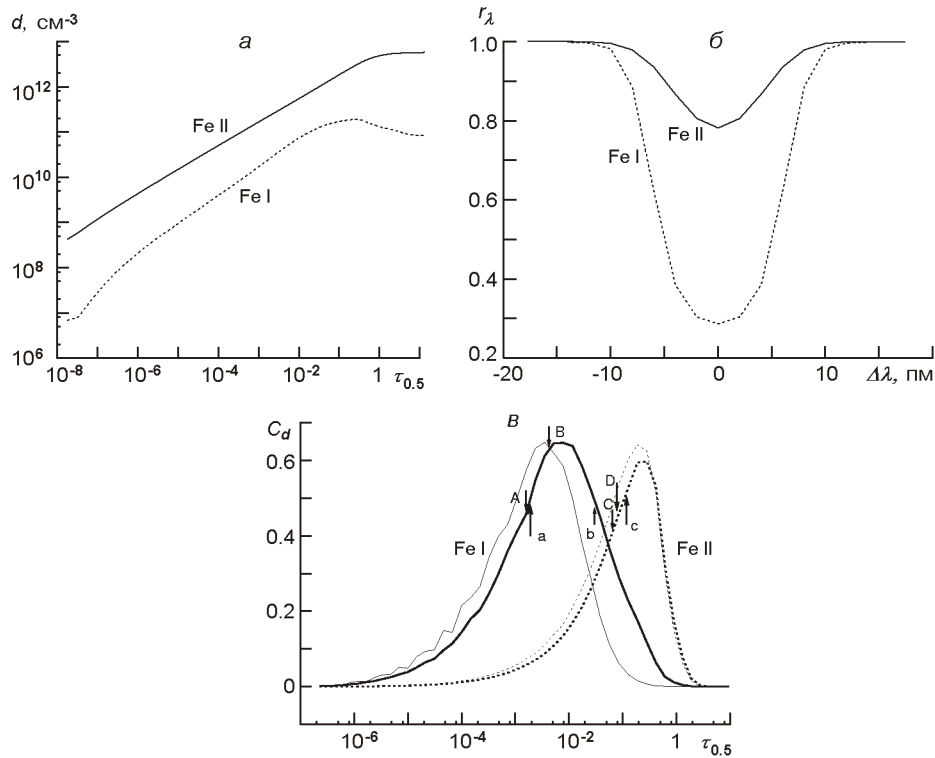


Рис. 2. *a* — изменение концентрации Fe I и Fe II с глубиной в солнечной атмосфере; *б* — рассчитанные для центра диска Солнца профили линий поглощения Fe I 525.020 нм и Fe II 608.410 нм; *в* — функции вклада C_d , рассчитанные для этих линий поглощения. Стрелки, направленные вниз, — значения функций вклада C_d на средних оптических глубинах $\langle \tau \rangle$, рассчитанных по формуле (3). Стрелки, направленные вверх, — значения C_d на средних глубинах, определяемых по депрессионным функциям вклада [3]

щения Fe I 525.020 нм и Fe II 608.410 нм соответственно). Эти средние глубины хорошо согласуются с глубинами, определенными в работе [3] (см. таблицу).

Глубины формирования линий резонансного дублета Li I в атмосферах звезд и коричневых карликов. Солнце. Линии резонансного дублета лития в спектре Солнца (G2V) достаточно слабы. Эквивалентная ширина более сильного компонента резонансного дублета лития составляет $W = 0.18$ пм [7]. Содержание лития в атмосфере Солнца оценивалось неоднократно [2, 7], в том числе и с учетом эффектов отклонения от ЛТР [4, 5, 8, 34]. Содержание лития в атмосфере Солнца, определяемое по эквивалентной ширине его линий, зависит от используемой модели атмосферы [5], поэтому мы используем значение $\lg N(\text{Li}) = 1.06$, определенное в работе [2] для модели атмосферы HOLMU. Это содержание много меньше «космического» $\lg N(\text{Li}) = 3.2$, так как значительное количество лития выгорело внутри Солнца на ранних стадиях эволюции.

Синтетический спектр в области линий резонансного дублета лития, рассчитанный для модели атмосферы HOLMU, списков атомных

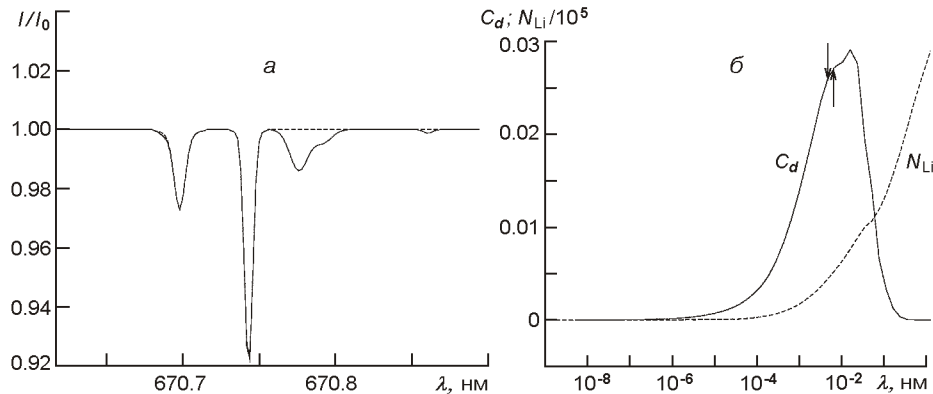


Рис. 3. *a* — линии резонансного дублета лития, рассчитанные для содержания $\lg N(\text{Li}) = -10.98$ для модели солнечной атмосферы HOLMU (вклад атомных линий показан штриховой линией); *б* — функции вклада C_d для линий лития. Стрелки, направленные вниз, — значения функций вклада C_d на средних оптических глубинах $\langle \rangle$, рассчитанных по формуле (3). Стрелки, направленные вверх, — значения C_d на средних глубинах, определяемых по депрессионным функциям вклада [3]

линий VALD и содержания лития $\lg N(\text{Li}) = 1.06$ показан на рис. 3, *a*. Как уже отмечалось выше, линии резонансного дублета атома Li I формируют в спектре Солнца бленду. Функцию отклика C_d мы рассчитывали именно для результирующей бленды, сформированной двумя линиями поглощения ${}^7\text{Li}$, в отличие от работы [3], в которой расчеты производились для более сильной линии резонансного дублета. Заметим, что это не должно заметным образом изменить результат, поскольку обе линии формируются с основного уровня атома лития, т. е. с уровня с нулевым потенциалом возбуждения.

Рассчитанная нами функция вклада C_d для линий резонансного дублета лития показана на рис. 3, *б*. Видно, что линии резонансного дублета лития формируются достаточно глубоко в атмосфере Солнца ($\langle \rangle = 0.048$). Отметим, что эта оценка хорошо согласуется со значением $\langle \rangle = 0.066$ из работы [3] (см. таблицу).

М-гигант из системы RS Oph. Один из самых известных и наиболее изученных феноменов повторных новых (RN) формируется в системе RS Oph. Известно, что это — двойная система, состоящая из красного гиганта и белого карлика с массой несколько меньше предела Чандрасекара. Последняя вспышка 2006 г. наблюдалась в широком интервале длин волн, от рентгеновского до радиодиапазонов [9]. Вместе с тем сведения о химическом составе красного гиганта, который и поставляет вещество, необходимое для создания критической массы на поверхности белого карлика, до недавнего времени были весьма приблизительны — оценки параметра металличности в разных работах варьируют от -4 до $+0.5$ [32, 39].

В базе данных SIMBAD спектральный класс красного гиганта из системы RS Oph определен как M2III⁺. Полосы TiO не достигают той

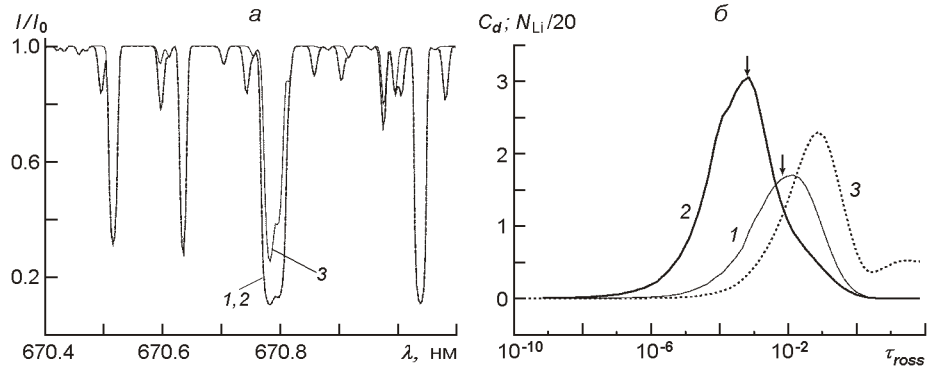


Рис. 4. *а* — линии резонансного дублета лития, рассчитанные для содержания лития $\lg N(\text{Li}) = 1.0$ и 2.0 (кривые 1 и 2) в теоретическом спектре RS Oph. Вклад атомных линий показан штриховой линией 3; *б* — функции вклада C_d для линий лития, рассчитанные для $\lg N(\text{Li}) = 1.0$ и 2.0 (кривые 1 и 2) и модели атмосферы красного гиганта с $T_{\text{эф}}/\lg g = 4200/0$, кривая 3 — значения $N(\text{Li})$

интенсивности, при которой они начинают доминировать на частотах линий резонансного дублета лития, что проявляется в спектрах [40]. Наши расчеты также показывают отсутствие сильного молекулярного поглощения в области 670.8 нм (рис. 4, *а*). В спектре заметны линии CN, но они слабые вследствие дефицита углерода в атмосфере звезды — в расчетах спектров мы использовали значения содержаний элементов из работ [20, 40].

Рассчитанные функции вклада C_d для линий резонансного дублета лития в атмосфере RS Oph показаны на рис. 4, *б*. Использовались два значения содержания лития, $\lg N(\text{Li}) = 1.0$ и 2.0 . Здесь и далее представлены результаты расчетов для интегрального потока от диска звезды F^l , а также для остаточных потоков $r = F^l / F^c$.

На рис. 4, *б* представлено распределение концентраций нейтрального лития с глубиной в атмосфере RS Oph. Для случая слабых линий поглощения вид функции вклада приближается к форме распределения концентрации атомов Li I с глубиной в атмосфере звезды, за исключением самых глубоких слоев атмосферы, излучение из которых практически не может покинуть атмосферу из-за большого поглощения на уровне фотосферы.

Вертикальными стрелками показаны рассчитанные значения $\langle \tau \rangle = 0.0069$ и 0.00064 для $\lg N(\text{Li}) = 1.0$ и 2.0 соответственно. При увеличении содержания лития в атмосфере красного гиганта и функция вклада C_d , и средняя глубина $\langle \tau \rangle$ формирования линий резонансного дублета лития сдвигаются во внешние части атмосферы. Функция вклада C_d «забывает» форму распределения концентрации нейтрального лития с глубиной.

C-гигант WZ Cas. Содержание лития в атмосферах звезд на поздних стадиях эволюции представляет несомненный интерес при решении многих вопросов звездной эволюции. В настоящее время счи-

тается установленным фактом, что в их атмосферах наблюдается литий, который был образован процессами нуклеосинтеза внутри звезды, а затем вынесен в атмосферу процессами перемешивания [28, 31]. Предполагается, что эти звезды могут быть важными (если не основными) поставщиками лития в галактическую материю [6, 41]. К таким звездам относится WZ Cas. Моделирование линий лития в ее атмосфере показывает очень высокие значения содержания лития, которые даже превышают «космическое» значение $\lg N(\text{Li}) = 3.2$, наблюдаемое в межзвездной среде и атмосферах молодых звезд типа Т Тау [18].

Формирование линий лития в атмосферах С-гигантов происходит в условиях сильного поглощения излучения линиями углеродосодержащих молекул. В области 670.8 нм доминируют полосы CN [42]. Температуры в надфотосферных слоях не превышают 2800 К, поэтому основная часть атомов лития находится на основном уровне. Линии лития оказываются очень сильными уже при $\lg N(\text{Li}) = 2.0$, а при $\lg N(\text{Li}) = 3.0$ для ядер линий резонансного дублета лития эффекты насыщения становятся значимыми на большом интервале длин волн. Крылья дублета при этом видны на расстояниях до нескольких ангстрем от центра линии. Наблюдаемые спектры WZ Cas и синтетические спектры области 670.8 нм, рассчитанные для модели атмосферы с $T_{\text{эф}}/\lg g/[\text{Fe}/\text{H}] = 3000/0.0/0.0$ и $\text{C}/\text{O} = 0.007$ при учете всех известных вкладчиков в непрозрачность, показаны в работе [42].

Функция вклада C_d для случая суперсильной линии 670.8 нм (рис. 5) заметно отличается от показанных ранее C_d для слабых линий. Два «горба» распределения соответствуют в этом случае глубинам формирования ядра линии и ее достаточно протяженных крыльев. Для удобства функции вклада на рис. 5 показаны в относительных единицах. Можно отметить ряд результатов.

— Учет CN не приносит существенных деформаций в рассчитанную форму C_d , по меньшей мере для случая $\lg N(\text{Li}) = 2.0$.

— При росте содержания лития в атмосфере область формирования ядер линий, как и ожидалось, сдвигается в область меньших оптических глубин. В то же время второй «горб» функции C_d практически остается на месте.

При увеличении содержания внешний «горб» в распределении C_d , расположенный на глубинах формирования ядра линии, уменьшается по отношению ко внутреннему «горбу», расположенному на глубинах формирования крыльев линий поглощения лития. Последнее обстоятельство имеет интересное следствие: формально рассчитанные средние глубины $\langle \rangle$ формирования линий резонансного дублета лития при $\lg N(\text{Li}) = 3.0$ больше, чем в случае $\lg N(\text{Li}) = 2.0$.

Строго говоря, при наличии двух «горбов» в распределении C_d с глубиной само понятие средней глубины формирования спектральной линии теряет физический смысл. Действительно, формально рассчитанные для $\lg N(\text{Li}) = 2.0$ и 3.0 средние глубины формирования $\langle \rangle$ показывают на слои атмосферы между двумя горбами, вклад которых в

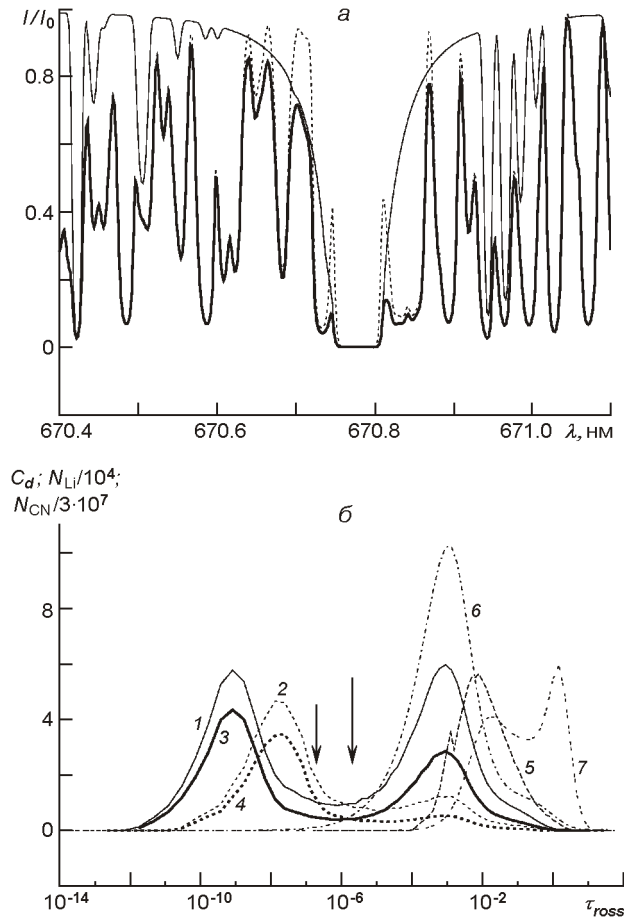


Рис. 5. *a* — линии резонансного дублета лития в теоретическом спектре WZ Cas, рассчитанные для содержаний $\lg N(\text{Li}) = 2.0$ и 3.0 (пунктирная и жирная кривые соответственно). Вклад атомных линий показан тонкой сплошной линией; *б* — функции вклада C_d для линий лития, рассчитанные для $\lg N(\text{Li}) = 2.0$ и 3.0 с учетом только лития (кривые 2 и 1 соответственно) и с учетом всех источников непрозрачности (кривые 4 и 3) в рамках модели атмосферы С-гиганта с $T_{\text{эф}}/\lg g = 3000/0/0$. Вертикальными длинной и короткой стрелками отмечены положения $\langle \tau \rangle$, рассчитанные для $\lg N(\text{Li}) = 3.0$ и 2.0 соответственно. Кривая 5 — функция $C_d/3$ для CN, кривые 6 и 7 — значения $N(\text{Li})$ и $N(\text{CN})$ соответственно

формирование линий резонансного дублета лития относительно невелик.

В любом случае рассчитанные функции вклада не отражают распределение с глубиной в атмосфере атомов лития, которое также показано на рис. 5. Оба «горба» функции вклада располагаются выше уровня в атмосфере, на котором располагается максимум распределения нейтральных атомов лития.

В рамках этой работы мы рассчитали функцию вклада и для молекулярных линий CN, которые блендируют линии резонансного дублета лития. В этом случае она имеет тот же смысл, что и для атомарных линий, и отображает вклад слоя, расположенного на оптической глубине, атмосферы в формирование результирующей (суммарной) экви-

валентной ширины всех линий CN, которые попадают в данный спектральный диапазон.

Из рис. 5 следует, что линии CN формируются ниже уровня формирования резонансных линий поглощения лития. Этот результат представляет интерес с точки зрения моделирования линий лития, поскольку в этом случае линии CN формируют своего рода подложку при формировании этих линий.

Коричневый карлик LP944-20. Сравнительно яркий карлик LP 944-20 спектрального класса M9 из паломарского каталога Лютена (другие имена ARPM J0340-3526, BRI V0337-3535, LEPM 3451, 2MASS WJ0339352- 352544) является коричневым карликом. Возраст этого M-карлика из скопления Кастора оценивается в 320 млн лет [29].

Наблюдаемые спектры LP 94420 представлены в работе [21]. Рассчитанные для модели атмосферы $T_{\text{эф}}/\lg g = 2000/4.5$ спектры LP944-20 в области $\lambda = 670.8$ нм показаны на рис. 6, а. Отличительной особенностью спектров поздних M-карликов является то, что крылья даже самых сильных линий поглощения нейтральных атомов практически полностью находятся под частоклом линий поглощения и систем полос TiO [19]. В спектрах поздних M-карликов, которые сохранили литий со стадии своего формирования, через мощную подложку, формируемую линиями поглощения этих полос TiO, пробиваются только насыщенные ядра линий Li $\lambda = 670.8$ нм. Собственно, критерий наблюдаемости этих линий поглощения и был предложен в качестве «литиевого теста» для окончательного выделения популяции коричневых карликов из семейства поздних M-карликов [17, 27].

В спектре LP944-20 наблюдается достаточно сильная линия резонансного дублета лития на фоне мощных полос TiO. Ранние оценки содержания лития $\lg N(\text{Li}) = 0.5$ были получены из анализа наблюдаемых эквивалентных ширин [35]. Однако недавний анализ спектра LP

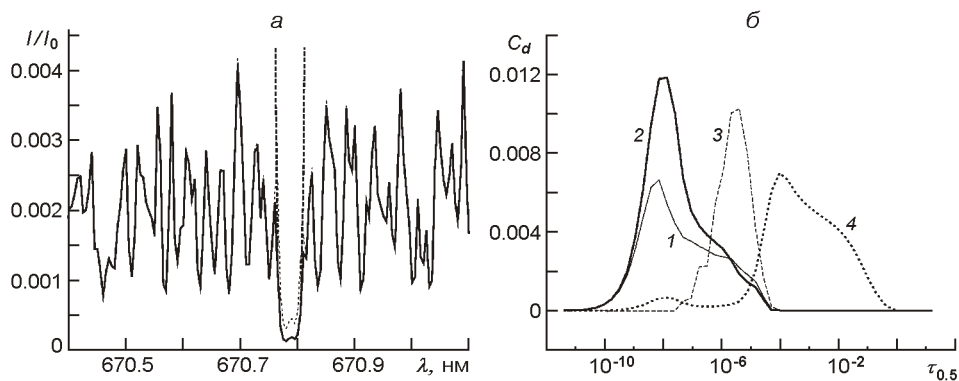


Рис. 6. а — линии резонансного дублета лития, рассчитанные для содержания $\lg N(\text{Li}) = 1.0$ и 2.0 в теоретическом спектре коричневого карлика LP944-20. Вклад атомных линий показан штриховой линией; б — функции вклада C_d для линий лития, рассчитанные для $\lg N(\text{Li}) = 1.0$ и 2.0 и модели атмосферы коричневого карлика с $T_{\text{эф}}/\lg g = 2000/4.5$. Кривые 1–4 — соответственно для синглета TiO+Li, дублета TiP+Li, TiO и дублета Li

94420, выполненный методом синтетического спектра, показал практически космическое содержание лития $\lg N(\text{Li}) = 3.2$ [21] в атмосфере LP944-20, что по сути прямо подтверждает субзвездную природу этого объекта.

Заметим, что представленные на рис. 6, а спектры показаны в величинах $r = H^l / H^c$, т. е. в остаточных потоках. Теоретический континуум не показан, он располагается намного выше верхней границы рисунка. Естественно, в наблюдаемых спектрах он не виден, поэтому его невозможно использовать для количественного анализа классическими методами кривых роста или моделей атмосфер.

В отсутствие сильного поглощения полосами TiO функция вклада C_d для линий резонансного дублета лития имеет характерную для сильных линий двухгорбую форму, но вклад протяженных крыльев здесь более выражен, чем в случае красных гигантов из-за большего ван-дер-ваальсового уширения профилей линий поглощения. Впрочем, и в этом случае внешний «горб» распределения C_d с глубиной достаточно заметен.

Мы рассчитали функцию вклада C_d линий поглощения молекулярных полос TiO в спектральной области вблизи резонансного дублета лития на 670.8 нм. Она также показана на рис. 6. Ее максимум располагается на глубинах $0.5 \cdot 10^{-6}$, выше уровня формирования «чистых» линий резонансного дублета Li. Можно сказать, что поглощение TiO «съедает» внутренний «горб» функции вклада C_d для линий поглощения Li, это соответствующим образом сказывается на профилях спектральных линий — поглощение TiO «съедает» протяженные крылья линий резонансного дублета. При этом поглощение TiO деформирует и внешний «горб» функции вклада линий резонансного дублета лития, но большая часть области формирования ядра дублета располагается над областью формирования TiO. В результате подавления внутреннего «горба» функции распределения C_d область формирования насыщенных линий лития смещается во внешние части атмосферы коричневого карлика. В наблюдаемых и рассчитанных спектрах LP944-20 ядро линий резонансного дублета лития четко выделяется на фоне полос TiO (6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использованная выше методика обладает рядом преимуществ среди других методик определения депрессионной функции вклада Унзольда — Пеккера: 1) методика основана на прямой оценке вклада конкретного слоя звезды в формирование эквивалентной ширины, ядра или крыльев спектральной линии; 2) она проста в реализации: практически всякая программа расчета синтетического спектра может быть легко адаптирована для расчетов C_d ; 3) методика может применяться при анализе спектров любой сложности — одиночных «чистых» ли-

ний или синтетических спектров, отдельных линий или совокупности линий отдельного атома (или молекулы) в спектрах.

Полученные нами оценки глубин формирования избранных линий железа и лития в атмосфере Солнца хорошо согласуются с результатами Э. А. Гуртовенко и В. А. Шеминовой [3], полученными на основе использования методики депрессионных функций вклада. Вместе с тем применение нашей методики к анализу формирования очень сильных спектральных линий лития в атмосферах С-гигантов и коричневых карликов показало наличие двух разнесенных по глубине областей, в первой из которых формируются насыщенные ядра, а во второй — протяженные крылья линий поглощения.

В атмосфере С-гиганта линии резонансного дублета лития формируются в слое атмосферы над областью формирования линий поглощения молекулы CN, которые во многом и определяют вид спектра в области 670.8 нм.

В атмосфере коричневого карлика LP944-20 между областями формирования ядра и крыльев линии лития 670.8 нм находится область образования линий TiO, поглощение которыми и съедает достаточно протяженные крылья резонансного дублета Li I. В то же время область формирования ядра линии 670.8 нм находится выше слоя, в котором формируется поглощение TiO. В результате функция вклада для линий резонансного дублета Li 670.8 нм в спектре LP944-20 имеет более простую форму с одним «горбом» — ядро этой линии пробивается через частокол линий поглощения TiO и может быть использовано для численного анализа.

Автор благодарит А. Шаврину, В. Шеминову и Л. Яковину за сотрудничество и помощь. Эти исследования выполнялись при частичной поддержке грантов Royal Society, программы «Космомикрофизика» Национального космического агентства и Национальной академии наук Украины. Автор благодарит др. Р. Куруца за предоставленную версию ATLAS12 и списки молекулярных линий, группу VALD за работу по созданию базы данных о спектральных линиях. Работа выполнялась с использованием базы данных SIMBAD (Страсбург, Франция).

1. Гурвиц Л. В., Вейц И. В., Медведев В. А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. — М.: Наука, 1982.
2. Гуртовенко Э. А., Костик Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
3. Гуртовенко Э. А., Шеминова В. А. Глубины образования фраунгоферовых линий. — Киев, 1997.—36 с.—(Препринт / НАН Украины, Главная астрономическая обсерватория; № ГАО-07-1Р).
4. Павленко Я. В. Эффекты отклонения от ЛТР и содержание лития в атмосферах звезд. I. Солнце и К-гигант 9 Волопаса // Кинематика и физика небес. тел.—1989.—5.—С. 56—63.
5. Павленко Я. В. Статистическое равновесие лития в атмосферах карликов различной металличности // Астрон. журн.—1994.—71.—С. 600—606.

6. *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.
7. *Brault J. W., Muller J. A.* The solar lithium abundance. I—Observations of the solar lithium feature at 6707.8 Å // *Solar Phys.*—1975.—**41**.—P. 43—52.
8. *Carlsson M., Rutten M. J., Bruls J. H. M. J., Schukina N. G.* The non-LTE formation of Li I lines in cool stars // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**288**.—P. 860—882.
9. *Evans A., Bode M. F., O'Brien T. J.* RS Ophiuchi (2006) // *ASP Conf. Ser.*—2008.—P. 141—144.— (Eds A. Evans, M. F. Bode, T. J. O'Brien).
10. *Fekel F. C., Joyce R. R., Hinkle K. H., Skrutskie M. F.* Infrared spectroscopy of symbiotic stars. I. Orbits for well-known S-type systems // *Astron. J.*—2000.—**119**.—P. 1375—1388.
11. *Gurtovenko E. A., Ratnikova V. A., de Jager C.* On the average optical depth of formation of weak Fraunhofer lines // *Solar Phys.*—1974.—**37**.—P. 43—52.
12. *Gurtovenko E. A., Ratnikova-Sheminova V. A.* Comparison of effective depths of Fraunhofer line formation calculated by various methods // *Solar Phys.*—1976.—**58**.—P. 241—242.
13. *Holweger H., Muller E. A.* The photospheric barium spectrum. Solar abundance and collision broadening of BA II lines by hydrogen // *Solar Phys.*—1974.—**39**.—P. 19—30.
14. *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.
15. *Kurucz R. L.* Data Bank.—1993—1994.—Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993.—CD ROM N 1—22.
16. *Magain P.* Contribution functions and the depths of formation of spectral lines // *Astron. and Astrophys.*—1986.—**163**.—P. 135—139.
17. *Magazzj A., Martin E. L., Rebolo R.* A spectroscopic test for substellar objects // *Astrophys. J.*—1993.—**404**.—P. L17—L20.
18. *Magazzu A., Rebolo R., Pavlenko Ya. V.* Lithium abundances in classical and weak T Tauri stars // *Astrophys. J.*—1992.—**392**.—P. 159—171.
19. *Pavlenko Ya. V.* Analysis of the spectra of two Pleiades brown dwarfs: Teide 1 and Calar 3 // *Astrophys. Space Sci.*—1997.—**253**.—P. 43—53.
20. *Pavlenko Ya. V., Evans A., Kerr T., et al.* Metallicity and effective temperature of the secondary of RS Ophiuchi // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**485**.—P. 541—545.
21. *Pavlenko Ya. V., Jones H. R. A., Martin E. L., et al.* Lithium in LP944-20 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**380**.—P. 1285—1296.
22. *Pavlenko Ya. V., Rebolo R., Martin E. L., Garcia Lopez R. J.* Formation of lithium lines in very cool dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**303**.—P. 807—818.
23. *Pecker J. C.* Contribution a la theorie du type spectral: IV. La formation des raies dans les spectres stellaires // *Ann. Astrophys.*—1951.—**14**.—P. 115—151.
24. *Plez B.* A new TiO line list // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**337**.—P. 495—500.
25. Proc. of IAUS198: The light elements and their evolution / Eds L. da Silva, R de Nadeiros, M. Spite. — 2000.—590 p. held 22-26 Nov. 1999, Natal, Brazil.
26. Proc. of IAUS 228: From lithium to uranium: elemental tracers of early stellar evolution / Eds V. Hill, P. Francois, F. Primas. — Cambridge Univ. Press, 2005.—617 p. held on May 23-27, 2005, Paris.
27. *Rebolo R., Martin, E. L., Magazzu A.* Spectroscopy of a brown dwarf candidate in the Alpha Persei open cluster // *Astrophys. J.*—1992.—**389**.—P. L83—L86.
28. *Renzini A., Voli M.* Advanced evolutionary stages of intermediate-mass stars. I. Evolution of surface compositions // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**94**.—P. 175—193.
29. *Ribas I.* The field brown dwarf LP 944-20 and the Castor moving group // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**400**.—P. 297—302.

30. *Rosino L.* Proceeding of RS Ophiuchi (1985) and the recurrent nova phenomenon / Ed. by M. F. Bode. — Utrecht: VNU Science press, 1987.—10 p.
31. *Sackmann I. J., Boothroyd A. I.* The creation of super-rich lithium giants // *Astrophys. J.*—1992.—**392**.—P. L71—L74.
32. *Scott A. D., Rawlings J. M. C., Krautter J., Evans A.* Evidence for a change of composition in the giant component of RS-Ophiuchi after the 1985 outburst // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1994.—**268**.—P. 749—755.
33. *Shore S. N., Kenyon S. J., Starrfield S., Sonneborn G.* On the interpretation of the ultraviolet spectra of symbiotic stars and recurrent novae. II. The 1985 outburst of RS Ophiuchi // *Astrophys. J.*—1996.—**456**.—P. 717—737.
34. *Steenbock H., Holweber H.* Statistical equilibrium of lithium in cool stars of different metallicity // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**130**.—P. 319—323.
35. *Tinney C. G.* The intermediate-age brown dwarf LP944-20 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**296**.—P. L42—L44.
36. *Tsuji T.* Molecular abundances in stellar atmospheres. II. // *Astron. and Astrophys.*—1973.—**23**.—P. 411—431.
37. *Unsold A.* Zur Deutung der Intensitätsverteilung in den Fraunhoferschen Linien. II. Teil: Die Intensität der Linienflügel. Approximative Lösung der Schwarzschild'schen Integralgleichung für eine beliebig geschichtete Atmosphäre // *A. Z. Astrophys.*—1932.—**4**.—S. 339—357.
38. *Unsold A.* *Physics der Sternatmosphären.* — Berlin: Springer, 1955.—866 p.
39. *Wallerstein G., Harrison T., Munari U.* The metallicity and lithium abundances in the repeating novae, RS Oph and T CrB // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—2006.—**38**.—P. 1160.
40. *Wallerstein G., Harrison T., Munari U., Vanture A.* The metallicity and lithium abundances of the recurring novae T CrB and RS Oph // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—2008.—**120**.—P. 492—497.
41. *Wallerstein G., Knapp G. R.* Carbon stars, AR // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**36**.—P. 369—434.
42. *Yakovina L., Pavlenko Ya., Abia C.* Lithium abundances in the atmospheres of SLR C-Giants WZ Cas and WX Cyg from resonance and subordinate Li I Lines // *Astrophys. and Space Sci.*—2003.—**288**.—P. 279—286.

Поступила в редакцию 12.03.09