

УДК 524.314-355

А. В. Шаврина<sup>1</sup>, В. Р. Халак<sup>1</sup>, Н. Г. Михайлицкая<sup>1</sup>, Н. С. Полосухина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного, 27

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»  
98409 Крым, п. Научный

### Учет магнитного расщепления линий при определении содержания лития в атмосфере $\alpha$ Ap-звезды HD 101065

*Выполнены расчеты синтетического спектра с учетом зеемановского расщепления в магнитном поле для  $\alpha$ Ap-звезды HD 101065 (звезда Пшибыльского) в спектральной области  $\lambda\lambda$  670.58–670.87 нм с целью описания наблюдаемого спектра вблизи линии лития  $\lambda$  670.8 нм. При детальном расчете синтетического спектра учитывались также сверхтонкая структура линий лития, его изотопный состав и блендирование линиями редкоземельных элементов (Ce II, Nd II, Sm II и др.), также расщепленных в магнитном поле. Это позволило оценить влияние магнитного расщепления на оценки содержания лития в атмосфере звезды и величины изотопного отношения  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ .*

*ВРАХУВАННЯ МАГНІТНОГО РОЗЩЕПЛЕННЯ ЛІНІЙ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ВМІСТУ ЛІТІЮ В АТМОСФЕРІ  $\alpha$ AP-ЗІРКИ HD 101065, Шаврина А. В., Халак В. Р., Михайлицька Н. Г., Полосухіна Н. С. — Зроблено розрахунки синтетичного спектру з урахуванням зееманівського розщеплення у магнітному полі для  $\alpha$ Ap-зірки HD 101065 (зірки Пшибильського) у спектральній області  $\lambda\lambda$  670.58–670.87 нм для опису спостереженого спектру поблизу лінії літію  $\lambda$  670.8 нм. При детальних розрахунках синтетичного спектру враховувалась надтонка структура ліній літію, його ізотопний склад та блендування лініями рідкоземельних елементів (Ce II, Nd II, Sm II та ін.), також розщеплених у магнітному полі. Це дозволило оцінити вплив магнітного розщеплення на оцінку вмісту літію в атмосфері зірки та величини ізотопного відношення  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ .*

*THE INCLUSION OF MAGNETIC SPLITTING OF LINES IN THE DETERMINATION OF THE LITHIUM ABUNDANCE AND ISOTOPIC RATIO IN THE ATMOSPHERE OF THE  $\alpha$ AP-STAR HD 101065, by Shavrina A. V., Khalack V. R., Mykhailiyska N. G., Polosukhina N. S. — Calculations of synthetic spectra with the Zeeman magnetic splitting of lithium and rare earth (Ce II, Nd II, Sm II and others) lines for the  $\alpha$ Ap-star HD 101065 (Przybylski's star) in a spectral region of 670.58 to 670.87 nm were carried out to fit to an observed spectrum near the lithium line  $\lambda = 670.8$  nm.*

*The hyperfine structure of lithium lines are taken into account in detailed calculations. This allowed us to evaluate the influence of magnetic splitting on estimates of the lithium abundance in the star atmosphere and a value of the isotopic ratio  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ .*

## ВВЕДЕНИЕ

Звезда HD 101065 наиболее необычна по пекулярности спектра среди  $\alpha$ Ar-звезд, поскольку избытки содержаний редкоземельных элементов для нее достигают 4 dex [5, 31]. Она открыта Пшибыльским в 1975 г. и носит его имя [22, 23]. Он же предсказал наличие магнитного поля у этой звезды и объяснил поверхностные аномалии содержаний элементов стабильностью атмосферы, обусловленной сильным магнитным полем. Первое измерение величины магнитного поля у этой звезды, порядка 0.25 Тл, было выполнено в 1976 г. Вольфом и Хагеном [32]. Спустя несколько лет Куртц и Вегнер [14] открыли четкие пульсации фотометрических кривых блеска в видимом диапазоне с амплитудой порядка 0.013<sup>m</sup> и периодом 12 мин. По сути HD 101065 была первой Ar-звездой, у которой удалось обнаружить быстрые осцилляции блеска. Впоследствии данный феномен оказался характерным для ряда других Ar-звезд, которые образовали группу  $\alpha$ Ar-звезд (rapid oscillating Ar stars). Первые попытки идентифицировать наблюдаемые в спектре HD 101065 линии химических элементов были сделаны Пшибыльским [22, 23] и Уорнером [30]. В указанных выше работах на основе первых результатов анализа спектров впервые упоминается о возможном наличии резонансного дублета лития в спектре HD 101065.

Детальный количественный анализ спектра этой звезды был выполнен впервые Каули и Матисом [6] в спектральном диапазоне  $\lambda\lambda$  390—650 нм. Впервые было указано на наличие линий дважды ионизованных редкоземельных элементов (Pr III, Nd III, Ce III), что не очень согласуется с низким значением эффективной температуры ( $T_{\text{эф}} \sim 6000$  К), полученным впервые Пшибыльским [24] и принятым для HD 101065.

В этой работе приведена оценка магнитного поля 0.25 Тл. Следующим этапом в исследовании этой уникальной  $\alpha$ Ar звезды была работа Каули и др. [7]. Они определили содержания 54 элементов и величину магнитного поля (0.23 Тл) по уширению трех REE линий (Gd II  $\lambda$  574.939 нм, Sm II  $\lambda$  629.468 нм, Gd II  $\lambda$  661.006 нм). Было отмечено, что спектральные пекулярности, подобные наблюдаемым в HD 101065, могут развиваться только в звездах с неглубокими конвективными зонами, т. е. в звездах спектрального класса не позднее F2. Одно из возможных объяснений — то, что атмосфера может быть стабилизирована наличием сильного магнитного поля.

В работе [7] анализ содержания химических элементов в атмосфере звезды выполнен по области  $\lambda\lambda$  390—650 нм, но в ней не рассматривался вопрос о содержании лития. Работа А. В. Шавриной и др. [27] явилась в некотором роде дополнением к исследованию [7] для области  $\lambda\lambda$  667.5—673.5 нм. В ней выполнен анализ литиевой бленды  $\lambda$  670.8 нм, и определено содержание лития в атмосфере HD 101065 без учета зеемановского расщепления линий в магнитном поле, — оно компенсировалось принятием повышенной скорости микротурбуленции  $V_t = 2$  км/с.

## ЛИТИЙ В СПЕКТРЕ HD 101065

Впервые о наличии лития в спектре данной звезды упомянул Пшибыльский [22] в 1961 г., и Уорнер [30] провел специальные наблюдения в спектраль-

ной области  $\lambda\lambda$  377—688 нм (дисперсия 0.6 нм/мм), используя 188-см рефлектор обсерватории Радклиф (Претория). Он обнаружил в области  $\lambda\lambda$  550—688 нм, очень сильные линии однажды ионизованных редкоземельных элементов, относительные интенсивности которых подобны лабораторным интенсивностям из таблиц Меджерс и др. [19]. Однако, как и упоминал Пшибыльский [22], линия Sm II  $\lambda$  670.745 нм, может рассматриваться только как часть литиевой бленды, а главный вклад в наблюдаемый профиль бленды вносит резонансный дублет лития. Первая оценка содержания лития по отношению к солнечному его содержанию сделана в работе Уорнера [30] ( $[Li] = 2.4$ ), и в ней же впервые сообщается о возможном наличии  ${}^6Li$ .

#### НАБЛЮДЕНИЯ

Анализируемые спектры с разрешением 100 000 и высоким ( $> 100$ ) отношением сигнала к шуму были получены П. Нормом в фокусе кудэ 1.5-м телескопа обсерватории ESO. Приемной матрицей служила матрица ESO CCD 34 с 2048 пикселями вдоль дисперсии. Торий-аргоновая лампа использовалась для калибровки по длинам волн с точностью, лучшей чем 0.3 км/с. Предварительная обработка выполнена П. Нормом на базе пакета программ INAR обсерватории ESO.

В табл. 1 приводятся время наблюдений, экспозиция и охватываемый диапазон длин волн.

Таблица 1. Характеристика наблюдений HD 101065

Номер спектра	Дата, март 1996	UT	Экспозиция, мин	HD, 2450000 +	$\lambda\lambda$ , нм
04	11	5 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup>	20	153.726	667.5—673.5
26	10	4 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup>	20	152.705	612.0—618.0

#### РАСЧЕТЫ МАГНИТНОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ЛИНИЙ

Мы рассчитывали расщепление спектральных линий в слабом магнитном поле согласно теории сложного эффекта Зеемана (при нормальном эффекте Зеемана, принимая во внимание только орбитальный момент электрона, без учета его спинового момента, линия расщепляется на три компонента):

$$\delta\lambda = (M_{J_1}g_1 - M_{J_2}g_2) \frac{1}{4\pi c} (e/m_0)H\lambda^2/c, \quad (1)$$

где  $H$  — напряженность магнитного поля,  $g_1$ ,  $g_2$  и  $M_{J_1}$ ,  $M_{J_2}$  — соответственно множители Ланде и магнитные квантовые числа для верхнего и нижнего уровней [1], а  $M_J = -J, -J + 1, \dots, 0, \dots, J - 1, J$ . При зеемановском расщеплении квантовые переходы между уровнями с  $\delta M = 0$  приводят к образованию  $\pi$ -компонентов, в то время как переходы между уровнями с  $\delta M = \pm 1$  приводят к образованию двух групп  $\sigma$ -компонентов. В случае наблюдений, выполненных поперек линий магнитного поля, сумма интенсивностей всех  $\pi$ -компонентов равна сумме интенсивностей всех  $\sigma$ -компонентов. В общем случае, когда луч зрения составляет с линиями магнитного поля угол  $\alpha$  (без учета дифференциальных коэффициентов поглощения в линиях разной поляризации), интенсивности  $\pi$ - и  $\sigma$ -компонентов соотносятся как [1]:

Таблица 2. Формулы для расчета относительных интенсивностей компонентов зеемановского расщепления линий

Переход	$J \rightarrow J - 1$	$J \rightarrow J$
При поперечном наблюдении		
$M_j \rightarrow M_j - 1$	$1/4(J + M_j)(J + M_j - 1)$	$1/4(J + M_j)(J - M_j + 1)$
$M_j \rightarrow M_j$	$(J + M_j)(J - M_j)$	$M_j^2$
$M_j \rightarrow M_j + 1$	$1/4(J - M_j)(J - M_j - 1)$	$1/4(J - M_j)(J + M_j + 1)$
При продольном наблюдении		
$M_j \rightarrow M_j - 1$	$1/2(J + M_j)(J + M_j - 1)$	$1/2(J + M_j)(J - M_j + 1)$
$M_j \rightarrow M_j$	0	0
$M_j \rightarrow M_j + 1$	$1/2(J - M_j)(J - M_j - 1)$	$1/2(J - M_j)(J + M_j + 1)$

$$I_{\sigma-} : I_{\pi} : I_{\sigma+} = \frac{1}{2} (1 + \cos^2\alpha) : \sin^2\alpha : \frac{1}{2} (1 + \cos^2\alpha) \quad (2)$$

Точные формулы для расчета относительной интенсивности расщепленных линий, образованных в результате квантового перехода с уровня с магнитным квантовым числом  $M_j$ , приведены в табл. 2 для случая поперечных и продольных наблюдений.

Необходимые для расчетов магнитного расщепления квантовые числа были определены согласно электронным конфигурациям термов из списков Куруца (CD-ROM 23, [15]). Факторы Ланде рассчитывались по этим же данным, а также брались из данных NIST для соответствующих уровней энергии, если они там приводились, причем предпочтение отдавалось последним. Данные об энергиях уровней, электронных конфигурациях, квантовых числах для полного момента  $J$  и факторы Ланде  $g$  со ссылками для линий с учитываемым зеемановским расщеплением приводятся в табл. 3. Полный список линий, участвующих в расчетах синтетического спектра, дается в табл. 2 работы [27]. Рассчитанный для разных значений усредненной (по видимому полушарию звезды) напряженности магнитного поля  $H = (H_x^2 + H_y^2 + H_z^2)^{1/2}$  и углов, образованных усредненным вектором поля и лучом зрения, синтетический спектр сравнивался с наблюдаемым.

Отметим, что обычно напряженность магнитного поля измеряется по линиям железа с факторами Ланде  $g > 3.0$ . Но для HD 101065 определен дефицит железа величиной около порядка и большой избыток редкоземельных элементов, поэтому чистых линий железа нет (долгое время их вообще не могли обнаружить), и диагностика поля проводится по REE линиям [7].

#### АНАЛИЗ СПЕКТРА HD 101065

Детальный анализ спектра HD 101065 выполнен в работе [7] с моделью атмосферы  $T_{\text{эф}} = 6600$  К и  $\lg g = 4.2$ . Мы использовали модель Я. Павленко с такими же параметрами и содержаниями элементов, как и в работе [27].

Анализ спектра HD 101065 выполнен методом синтетического спектра на основе моделей атмосфер. Для расчетов использовались программы Цымбала STARSP [29] и ROTATE [25]. При анализе использовались списки атомных линий VALD [13] и списки REE-линий из базы данных

Таблица 3. Список линий с учитываемым магнитным зеемановским расщеплением

Элемент	$\lambda$ , нм	$E''$ , $\text{см}^{-1}$	$J''$	$T_{\text{low}}$	$g''$	Источник	$E'$ , $\text{см}^{-1}$	$J'$	$T_{\text{up}}$	$g'$	Источник
Ce II	670.6051	14827.623	7/2	$^2G$	0.889	calc	29735.413	9/2	—	1.112	NIST
Pr III	670.6705	4453.760	15/2	$^4I$	2.0	calc	19360.110	13/2	$^2I$	1.077	calc
Sm II	670.7473	7524.860	5/2	$^8H$	0.70	NIST	22429.490	5/2	—	1.30	NIST
Sm II	670.7648	14084.550	13/2	$^8F$	1.514	NIST	28988.790	11/2	—	1.31	NIST
Nd II	670.7755	1470.097	11/2	$^6I$	1.025	NIST	16374.100	9/2	$^6K$	0.622	NIST
Sm II	670.7799	16428.700	5/2	$^6D$	1.355	NIST	31332.65	5/2	—	1.76	NIST
$^7\text{Li}$ I	670.7756	0.034	1/2	$^2S$	2.0	calc	14903.983	3/2	$^2P$	1.333	calc
$^7\text{Li}$ I	670.7768	0.020	1/2	$^2S$	2.0	calc	14903.983	3/2	$^2P$	1.333	calc
$^7\text{Li}$ I	670.7907	0.034	1/2	$^2S$	2.0	calc	14903.649	1/2	$^2P$	0.666	calc
$^7\text{Li}$ I	670.7908	0.034	1/2	$^2S$	2.0	calc	14903.646	1/2	$^2P$	0.666	calc
$^7\text{Li}$ I	670.7919	0.020	1/2	$^2S$	2.0	calc	14903.649	1/2	$^2P$	0.666	calc
$^6\text{Li}$ I	670.7920	0.008	1/2	$^2S$	2.0	calc	14903.632	3/2	$^2P$	1.333	calc
$^7\text{Li}$ I	670.7920	0.020	1/2	$^2S$	2.0	calc	14903.646	1/2	$^2P$	0.666	calc
$^6\text{Li}$ I	670.7923	0.004	1/2	$^2S$	2.0	calc	14903.632	3/2	$^2P$	1.333	calc
Nd II	670.8030	12276.210	11/2	$^4K$	0.870	NIST	27179.602	9/2	—	0.915	NIST
$^6\text{Li}$ I	670.8073	0.006	1/2	$^2S$	2.0	calc	14903.296	1/2	$^2P$	0.666	calc
Ce II	670.8077	18147.005	5/2	$^2D$	1.200	calc	33050.921	3/2	$^4P$	1.426	NIST
Ce II	670.8099	5661.357	11/2	$^4H$	1.085	NIST	20554.596	11/2	$^2H$	1.091	calc

DREAM [4], причем там, где был выбор, предпочтение отдавалось величинам  $gf$  из DREAM. Кроме того, мы рассчитали длины волн линий редкоземельных элементов (однажды и дважды ионизованных) на основе уровней энергий REE из базы данных NIST [18] с учетом правил отбора ( $\delta J = 0, \pm 1$ ). При этом соблюдалось правило сочетания четного и нечетного уровней энергии для нижнего и верхнего состояния (odd-even и even-odd). Для линий, отсутствующих в базах данных VALD и NIST, значения  $gf$  подбирались из лучшего совмещения наблюдаемого и рассчитанного спектров. В непосредственной близости от линии лития была лишь одна такая линия — Sm II  $\lambda$  670.7779 нм. Мы смогли определить верхний предел величины  $gf$  для нее на уровне  $-2.68$ . Значения  $gf$  двух других линий, соседних с линией лития, Nd II  $\lambda$  670.7755 нм и  $\lambda$  670.8030 нм, были соответственно оценены как  $-3.55$  и  $-1.13$  в работе [27]. Оценки проводились по программе Коуэна дополнительно с использованием для второй линии пробного отождествления верхнего уровня, которого не было в списке уровней энергий REE элементов NIST. Эта линия составляет бленду с сильной линией Ce II  $\lambda$  670.8099 нм, величина  $gf$  которой содержится в списках DREAM. В исследуемую область попадает также достаточно «чистая» линия церия Ce II  $\lambda$  670.6051 нм, и его содержание  $\lg N(\text{Ce}) = -7.63$ , определенное нами по этой линии, совпадает с оценкой Каули [7], равной  $-7.60$ . Такое содержание церия приводит к оценке  $\lg N(\text{Nd}) = -7.97$  по линии Nd II  $\lambda$  670.8030 нм, со значением  $\lg gf = -1.13$ . Эта оценка отличается от определенной ранее Каули и др. [7] оценки  $-7.65 \pm 0.28$  на величину 0.32, лишь слегка превышающую величину ошибки. Литиевый дублет был учтен как шесть компонентов мультиплетного расщепления для  $^7\text{Li}$  и три компонента  $^6\text{Li}$ , длины волн и силы осцилляторов которых взяты из работы Смита и др. [28].

Мы рассчитали профиль бленды Li I  $\lambda$  670.8 нм для величин напряженности магнитного поля 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 и 0.25 Тл и углов наклона вектора магнитного поля к лучу зрения  $\alpha = 0^\circ$  и  $50^\circ$ . Общее количество зеемановских компонентов составило около 300 линий, из них более

100 линий — это компоненты девяти литиевых линий, уже представляющих собой мультиплетную и сверхтонкую структуру двух изотопов лития ( ${}^7\text{Li}$  и  ${}^6\text{Li}$ ).

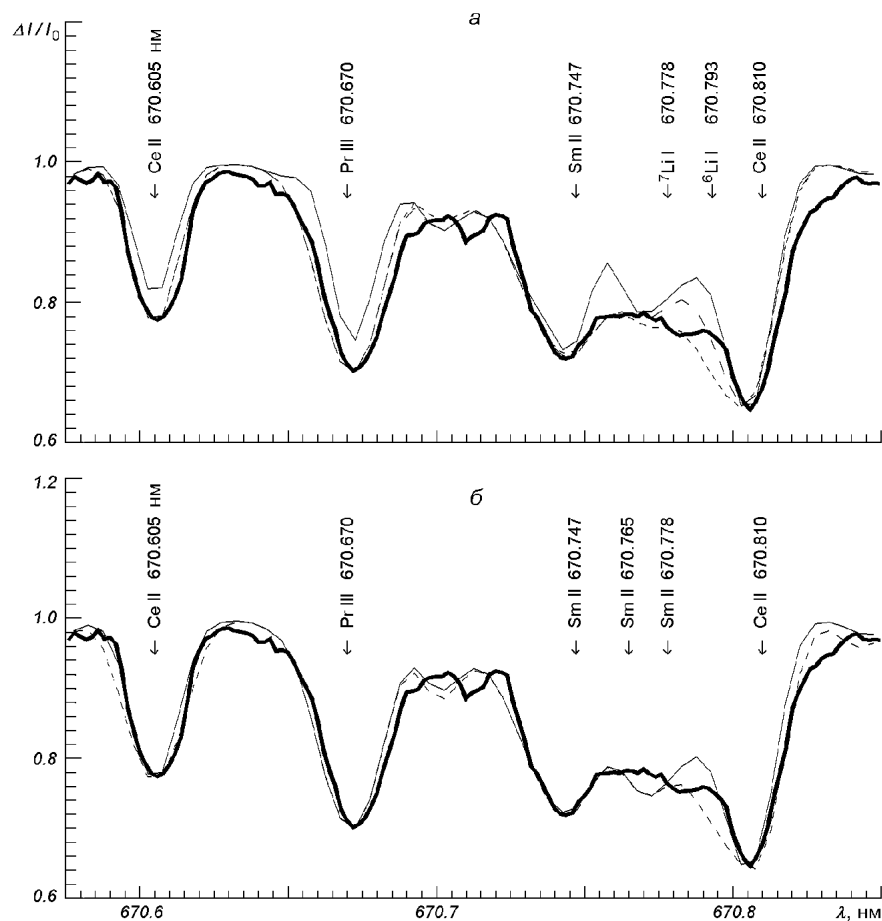
При расчетах синтетического спектра в работе [27] использовалась величина скорости микротурбуленции  $V_t = 2$  км/с, которая компенсировала магнитное уширение линий Се II. В данной работе учет зеемановского уширения по линиям Се II привел к оценке усредненной (по областям видимых пятен Се II) напряженности магнитного поля  $H = 0.15$  Тл и значению угла  $\alpha = 50^\circ$ . В то же время линии Pr III и Sm II лучше описываются при величине  $H = 0.25$  Тл и том же значении угла  $\alpha$ .

Особую проблему составляет величина напряженности магнитного поля в областях формирования линий лития. Как было показано в работах Н. С. Полосухиной и др. [21], А. В. Шавриной и др. [25, 26], литиевые пятна в  $\text{гоAr}$  звездах сосредотачиваются в довольно небольших областях вблизи полюсов магнитного поля. Наша оценка  $H = 0.01$  Тл для линий лития может быть объяснена наличием сложной структуры поверхностного магнитного поля звезды.

Как следует из исследований, выполненных на протяжении последнего десятилетия, структура поверхностного магнитного поля в  $\text{гоAr}$ -звездах, в основном существенно отличается от дипольной структуры. В работах [3, 12, 27] довольно успешно описана структура магнитного поля нескольких  $\text{гоAr}$ -звезд с помощью модели мультиполярного поля (диполь плюс линейный или нелинейный квадруполь), в то время как В. Р. Халак и др. [10] получили такую же точность описания структуры поля в рамках модели искусственных точечных источников поля [9]. Тем не менее, реальное поверхностное магнитное поле некоторых  $\text{гоAr}$ -звезд может иметь куда более сложную конфигурацию. Так, Кочухов и др. [11] нашли, что геометрия магнитного поля у звезды 53 Cam более сложная, чем при мультиполярном поле низких порядков. Соответственно, у звезды Пшибыльского с большой вероятностью можно предположить наличие довольно сложной структуры магнитного поля. Поскольку распределение химических элементов по поверхности  $\text{гоAr}$ -звезд неоднородно (носит пятенный характер), а пятна с аномальным химическим составом элементов Се II, Pr III и Li I слабо перекрываются, то мы можем получить из линий разных элементов или разных ионов одного элемента разное значение напряженности магнитного поля (усредненного по видимой поверхности пятен этих элементов или ионов).

На рисунке показаны расчеты синтетического спектра, выполненные с моделью атмосферы с  $T_{\text{эф}} = 6600$  К и  $\lg g = 4.2$ , для трех вариантов расчета: 1) расчет с учетом линий лития основного изотопа  ${}^7\text{Li}$ , 2) с включением линий изотопа  ${}^6\text{Li}$  и изотопным отношением  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$ , 3) расчет без участия поглощения в линиях лития с заменой их на линию Sm II  $\lambda 670.7799$  нм. Значение  $gf$  для указанной линии подбиралось из лучшего совмещения с наблюдаемым спектром. Сверху на рисунках обозначено положение линий, вносящих основной вклад в поглощение в данной длине волны.  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^6\text{Li}$  указывают положения минимумов бленд литиевых линий для каждого изотопа.

В табл. 4 даны содержания ионов, полученные из лучшего совмещения наблюдаемого спектра вблизи  $\lambda = 670.8$  нм, с рассчитанным для указанных выше трех вариантов расчета. Очевидно незначительное изменение подбираемых содержаний. Отметим, что введение магнитного уширения в литиевых линиях для поля 0.15—0.25 Тл, которое ухудшает согласие модельного спектра с наблюдаемым, снимает также проблему изотопного отношения — не требуются линии изотопа  ${}^6\text{Li}$ .



Сравнение наблюдаемого (жирная линия) и рассчитанных спектров HD 101065 вблизи бленды 670.8 нм: *a* — длинные штрихи — рассчитанный спектр с расщеплением линий Ce II при 0.15 Тл, Pr III — 0.25 Тл и Li I при 10 мТл только для  ${}^7\text{Li}$ , короткие штрихи — то же с учетом  ${}^6\text{Li}$  ( ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$ ); сплошная тонкая линия — спектр без магнитного расщепления при  $V_t = 0$ ; *b* — сплошная тонкая линия — расчет без линий лития, но с линией Sm II  $\lambda$  670.7799 нм при  $\lg gf = -0.629$  и  $H = 0.25$  Тл для линий Sm II, Pr III и 0.15 Тл для линий Ce II. Пунктирная линия — поле  $H = 0.25$  Тл для всех линий, включая Ce II. Сверху обозначены положения линий, вносящих основной вклад в поглощение,  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}$  указывают положения минимумов бленд

Таблица 4. Содержания ионов, линии которых вносят основной вклад в спектр поглощения HD 101065 вблизи 670.8 нм

Элемент	С магн. расщ.+ hfs		Sm II 670.78 нм	[27]	[7]
	Только ${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$	0.25 Тл	${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$	WIDTH-9
Li I	-9.12	-9.05	—	8.90	—
Ce II	-7.55	-7.55	-7.55	-7.63	$-7.60 \pm 0.26$
Pr III	-7.45	-7.45	-7.45	-7.55	$-7.46 \pm 0.16$
Nd II	-7.77	-7.87	-7.65	-8.07	$-7.75 \pm 0.19$
Sm II	-8.33	-8.33	-8.35	-8.32	$-7.65 \pm 0.28$

Наша оценка содержания лития с учетом магнитного расщепления в линиях Li при  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$  и  $H = 0.01$  Тл составила  $\lg N(\text{Li}) = -9.05$ . Отметим, что наблюдаемый минимум  $\lambda = 670.783$  нм в спектре соответствует именно бленде литиевых линий с отношением  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$ . Для линий только основного изотопа  ${}^7\text{Li}$  такой минимум приходится на  $\lambda = 670.780$  нм.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Работа [7] ясно продемонстрировала большой избыток REE-элементов и дефицит элементов железного пика (Fe, Ni), хотя кобальт оказался в избытке на 1.5 dex. Список линий REE был пополнен в этой работе вновь отождествленными линиями в спектральном диапазоне  $\lambda\lambda$  370—650 нм. Наши результаты относятся к области  $\lambda\lambda$  667.0—673.5 нм, где находится ярко выраженная бленда с резонансным дублетом лития  $\lambda$  670.8 нм. В работе [27] подробно описан подбор параметров синтетического спектра вблизи линии Li I  $\lambda$  670.8 нм, с учетом REE-линий с известными и неизвестными величинами  $gf$  и величиной параметра микротурбуленции  $V_t = 2$  км/с, компенсирующей магнитное уширение линий. Рассмотрены варианты расчета с включением и без включения линий лития, которые доказывают наличие дублета лития  $\lambda$  670.8 нм, в спектре HD 101065. Профиль наблюдаемой бленды описался лучше при заданном изотопном составе  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$ . В данной работе мы учли магнитное расщепление спектральных линий в исследуемом диапазоне спектра согласно эффекту Зеемана и его влияние на оценку содержания лития и его изотопного соотношения. Нами показано, что магнитное уширение REE линий вблизи  $\lambda = 670.8$  нм не заменяет наблюдаемое поглощение, приписываемое нами линиям лития с учетом сверхтонкой структуры, и лишь незначительно (0.15 dex) изменяет оценку содержания лития, полученную без учета эффекта Зеемана с величиной  $V_t = 2$  км/с, компенсирующей магнитное уширение. Наша оценка напряженности магнитного поля в области формирования линий лития  $H = 10$  мТл может быть объяснена наличием мультипольного поля. Обобщенная модель такого мультипольного поля разработана Баньюло и др. [3] и Пискуновым [20]. Разные величины напряженности магнитного поля для Ce II (0.15 Тл), Pr III и Sm II (0.25 Тл), полученные нами, согласуются с принятыми представлениями о пятном распределении химических элементов на поверхности Ар-звезд.

Пекулярный химический состав атмосферы звезды Пшибыльского с большим избытком редкоземельных элементов, возможно, свидетельствует о выносе в поверхностные слои звезды элементов r-процесса. Такое предположение впервые было высказано Уорнером в 1966 г. [30].

В то же время наблюдаемое высокое содержание лития (3.0 dex по отношению к водороду) означает, что есть причины, препятствующие полному разрушению лития при процессах перемешивания. Возможно, это — магнитное поле, величина которого на поверхности достигает 0.25 Тл. Кроме того, наблюдаемый литий может быть произведен так называемыми реакциями скальвания на поверхности звезды. В пользу этой гипотезы свидетельствует лучшее описание спектра с включением изотопа  ${}^6\text{Li}$  с отношением  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$ . Оценка Уорнера [30] содержания лития по спектру с разрешением 0.03 нм, составляла 2.4 dex по отношению к солнечной величине, т. е. 3.3 dex по отношению к водороду. Он же предположил наличие  ${}^6\text{Li}$  на поверхности HD 101065. Ее параллакс по измерениям со спутника HIPPARCHOS равен  $7.95 \pm 1.07$  мкс дуги, что приводит к абсолютной величине исследуемой звезды  $M_v = 2.5 \pm 0.3^m$ , т. е. позволяет отнести ее к субгигантам, не сильно проэволюционировавшим. Вместе с тем спектр ее подобен S-звездам, которые располагаются в другом месте диаграммы Герцшпрунга — Рассела, и атмосферы которых обогащены свежесинтезированным материалом из глубоких слоев. Описанные аномалии спектра звезды ждут своего объяснения. В работе [8] по отношению  $U/Th = 1$  определен возраст события, приведшего к обогащению поверхностных слоев звезды свежесинтезированным материалом (предположительно



взрыв Сверхновой — спутника HD 101065). Он оказался равным  $10^3$  лет. С таким предположением согласуются и наша оценка  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$ . Для свежесинтезированного лития в реакциях скалывания («spallation reactions») под действием высокоэнергетических лучей это отношение близко к 0.5 [16]. Для более уверенной оценки изотопного отношения для лития необходимы спектры с еще большим разрешением и более точное знание структуры магнитного поля звезды для учета магнитного расщепления в линиях. В будущем можно надеяться на получение высококачественных спектрополяриметрических наблюдений профилей Стокса для этой интересной звезды, что позволит восстановить картину магнитного поля. Также необходимы недостающие и более точные величины  $gf$  для линий редкоземельных элементов.

Авторы благодарят П. Норту за предоставление наблюдаемых спектров, В. В. Цымбала за вычислительные программы STARSP и ROTATE, Я. В. Павленко за расчеты модели атмосферы, П. Квине за расчеты дополнительных к спискам DREAM  $gf$ -величин и администрации баз данных VALD, DREAM, NIST, ADS, доступных через интернет.

1. Фриш С. Э. Оптические спектры атомов. — М.: Физматгиз, 1963.—640 с.
2. Шаврина А. В., Полосухина Н. С., Павленко Я. В. и др. Особенности спектра уникальной  $\alpha$ Ap-звезды HD 101065 в области резонансного дублета лития 670.8 нм // Астрон. журн.—2003.—80, N 7.—С. 538—544.
3. Bagnulo S., Landi Degl'Innocenti M., Landolfi M., Mathys G. A statistical analysis of the magnetic structure of CP stars // Astron. and Astrophys.—2002.—394, N 10.—P. 1023—1037.
4. Biemont E., Palmeri P., Quinet P. A new database of astrophysical interest // Astrophys. and Space Sci.—1999.—269/270.—P. 635—637.—(D.R.E.A.M. Database on Rare Earth at Mons. Univ. <http://www.umh.ac.be/astro/dream.shtml>).
5. Cowley C. R., Cowley A. P., Aikman G. et al. Element identifications in Przybylski's star // Astrophys. J.—1977.—216, N 1.—P. 37—41.
6. Cowley C. R., Mathys G. Line identification and preliminary abundances from the red spectrum of HD 101065 (Przybylski's star) // Astron. and Astrophys.—1998.—339, N 1.—P. 165—169.
7. Cowley C. R., Ryabchikova T., Kupka F., et al. Abundances in Przybylski's star // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2000.—317, N 1.—P. 299—309.
8. Cowley C. R., Hubrig S., Bord D. J. Actinides in HD 101065 (Przybylski's Star) // Amer. Astron. Soc.—2003.—202, N 32.—P. 3209—3211.
9. Gerth E., Glagolevskij Yu. V., Sholz G. Integral representation of the surface structure of the stellar magnetic field // Stellar Magnetic Fields / Eds Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk. — Moscow, 1997.—P. 67.
10. Khalack V. R., Zverko J., Ziznovsky J. Structure of the magnetic field in the Ap star HD 187474 // Astron. and Astrophys.—2003.—403, N 1.—P. 179—185.
11. Kochukhov O., Bagnulo S., Wade G.A., et al. Magnetic Doppler imaging of 53 Camelopardalis in all four Stokes parameters // Astron. and Astrophys.—2004.—414, N 2.—P. 613—632.
12. Kochukhov O., Piskunov N., Ilyin I., et al. Doppler imaging of stellar magnetic fields. III. Abundance distribution and magnetic field geometry of  $\alpha^2$  CVn // Astron. and Astrophys.—2002.—389, N 2.—P. 420—438.
13. Kupka F., Piskunov N. E., Ryabchikova T. A., et al. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1999.—138, N 1.—P. 119—133.
14. Kurtz D., Wegner G. The nature of Przybylski's star — an AP star model inferred from the light variations and temperature // Astrophys. J.—1979.—232, N 1.—P. 510—519.
15. Kurucz R. L. CD ROM N 1-23. — Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993—1994.
16. Knauth D. C., Federman S. R., Lambert D. L. An ultra-high-resolution survey of the interstellar  ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$  isotope ratio in the solar neighborhood // Astrophys. J.—2003.—586, N 1.—P. 268—285.
17. Landstreet J. D., Mathys G. Magnetic models of slowly rotating magnetic Ap stars: aligned magnetic and rotation axes // Astron. and Astrophys.—2000.—359, N 1.—P. 213—226.
18. Martin W. C., Reader J., Wiese W. L. NIST Compilations and databases for atomic spectra // 25th meeting of the IAU, Joint Discussion 17. — Sydney, 2003.—P. 13.—(<http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData>)
19. Meggers W. F., Corliss C. H., Seribnez B. F. Tables of spectral-line intensities // Nat. Bur. Stand. Mon.—1961.—32.

20. *Piskunov N.* Magnetic Doppler Imaging of CP Stars // ASP Conf. Ser.—2001.—248.—P. 293.
21. *Polosukhina N., Kurtz D., Hack M., et al.* Lithium on the surface of cool magnetic CP stars I. Summary of spectroscopic observations with three telescopes // *Astron. and Astrophys.*—1999.—351, N 1.—P. 283—291.
22. *Przybylski A.* HD 101065 — a G0 star with high metal content // *Nature.*—1961.—189, N 4766.—P. 739—739.
23. *Przybylski A.* HD 101065 — an astronomical enigma // *Nature.*—1966.—210, N 1.—P. 20—22.
24. *Przybylski A.* The effective temperature and electron pressure in the atmosphere of HD 101065 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1977.—178, N 3.—P. 735—743.
25. *Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Tsymbal V., et al.* Quantitative analysis of the spectrum of the magnetic roAp-star HD 83368 with “Lithium” spots // *Astron. Rept.*—2000.—77, N 4.—P. 235—245.
26. *Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Zverko J., et al.* Lithium on the surface of cool magnetic CP stars. II. Spectrum analysis of HD 83368 and HD 60435 with lithium spots // *Astron. and Astrophys.*—2001.—372, N 2.—P. 571—578.
27. *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 670.8 нм spectral region // *Astron. and Astrophys.*—2003.—409, N 2.—P. 707—717.
28. *Smith V. V., Lambert D. L., Nissen P. E.* Isotopic lithium abundances in nine halo stars. 1 // *Astrophys. J.*—1998.—506, N 1.—P. 405—423.
29. *Tsymbal V.* A software system for the analysis of the spectra of normal stars // *Odessa Astron. Publ.*—1994.—7, N 1.—P. 146.
30. *Warner B.* Lithium in the Peculiar star HD101065 // *Nature.*—1966.—211, N 5044.—P. 55.
31. *Wegner G., Petford A. D.* Abundance analysis of Przybylski’s star (HD 101065) // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1974.—168, N 3.—P. 557—575.
32. *Wolff S. C., Hagen W.* The magnetic field of HD 101065 // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1976.—88, N 522.—P. 119—121.

Поступила в редакцию 24.09.03