АНОМАЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЛИТИЯ В НЕСКОЛЬКИХ Ap-Bp-ЗВЕЗДАХ

А. В. Шаврина[1], Н. С. Полосухина[2], Н. А. Драке[3], Д. О. Кудрявцев[4], В. Ф. Гопка[5], В. А. Ющенко[5], А. В. Ющенко[6]

[1] *Главная астрономическая обсерватория НАН Украины*
e-mail: shavrina@mao.kiev.ua

[2] *Крымская астрофизическая обсерватория, Украина*
e-mail: polo@crao.crimea.ua

[3] *Санкт-Петербургский университет, Россия*
e-mail: drake@on.br

[4] *Специальная астрофизическая обсерватория, Россия*
e-mail: dkudr@sao.ru

[5] *Одесский национальный университет, Украина*
e-mail: gopkavera@mail.ru, 12345678e@mail.ru

[6] *Университет Сейджонга, Республика Корея*
e-mail: yua@sejong.ac.kr

По наблюдениям быстро вращающейся roAp-звезды HD 12098, выполненным на 6-м телескопе САО РАН (НЭС) в 2005–2008 годах для девяти вращательных фаз (0.001–0.817) с помощью программы В. Цымбала ROTATE были определены положения трех литиевых пятен, одно из которых совпало с положением одного полюса магнитного поля, два других расположены вблизи другого полюса, симметрично относительно него. Возможно, магнитное поле звезды имеет более сложную структуру, чем диполь [17]. Содержание лития в пятнах превышает космическое. Оно может быть объяснено диффузией лития в присутствии магнитного поля или образованием лития в реакциях "скалывания" на поверхности звезды вблизи полюсов магнитного поля (см., например, [4]). Определено также повышенное содержание лития в двух медленно вращающихся Ap-звездах HR 465 и HD 965. Анализ выполнен методом синтетического спектра с учетом магнитного расщепления линий в спектре по программе С. Хана SYNTHM [5].

ВВЕДЕНИЕ

Спектральные наблюдения Ap-CP-звезд на БТА (САО РАН) с эшеле-спектрометром НЭС [10] выполняются в рамках проекта "Литий в CP-звездах". Было обнаружено несколько звезд с аномальным содержанием лития. Среди этих звезд следует особо отметить осциллирующую звезду HD 12098, первую roAp-звезду, открытую недавно на северном небе [3]. В спектре этой звезды была обнаружена сильная и переменная линия лития Li I 6708 Å, анализ которой выявил повышенное содержание лития [1]. Было показано наличие литиевых пятен на поверхности этой звезды [17], аналогично roAp-звездам HD 83368 и HD 60435, для которых ранее были обнаружены на поверхности пятна высокого содержания лития [15]. Наблюдения 2008 года добавили три новых фазы, и мы предприняли новый анализ с программой Цымбала ROTATE на основе девяти наблюденных фаз (0.001–0.817). Также выполнен анализ литиевой бленды 6708 Å в двух медленно вращающихся Ap-звездах HR 465 и HD 965, для чего был использован метод синтетического спектра с учетом магнитного расщепления линий в спектре [5].

ЗВЕЗДА HD 12098

Методом синтетического спектра на основе моделей атмосфер с учетом линий из списка VALD и некоторых дополнительных блендирующих линий редкоземельных элементов (REE), рассчитанных авторами [16], выбраны параметры модели атмосферы HD 12098: $T_{эф} = 7750$ и $\lg g = 4.0$. Используя эту эффективную температуру и эволюционные треки из работы Шалера и др. [14] и формулы из статьи Кочухова и Баньо [6], мы определили радиус звезды $R = 1.71 R_{\odot}$, $\lg g = 4.2$, $V_{rot} = 15.8$ км/с, $i = 55°$ (с $v \sin i = 13$ км/с). Расчеты профиля литиевой бленды Li I 6708 Å с учетом магнитного поля были выполнены, используя программу Хана SYNTHM [5]. В работе [17] была построена модель дипольного магнитного поля звезды на основе данных Рябчиковой и др. [12] о величинах эффективного магнитного поля для этой звезды. С помощью программы Цымбала ROTATE [15] по наблюдениям этой звезды 2005–2007 гг. в фазах 0.018–0.573 (6 фаз) были определены положения литиевых пятен, которые почти совпали с положениями полюсов магнитного диполя, и содержания лития в них. Наблюдения 2008 года (Д. К.) добавили три новых фазы, и мы предприняли новый анализ с программой ROTATE на основе

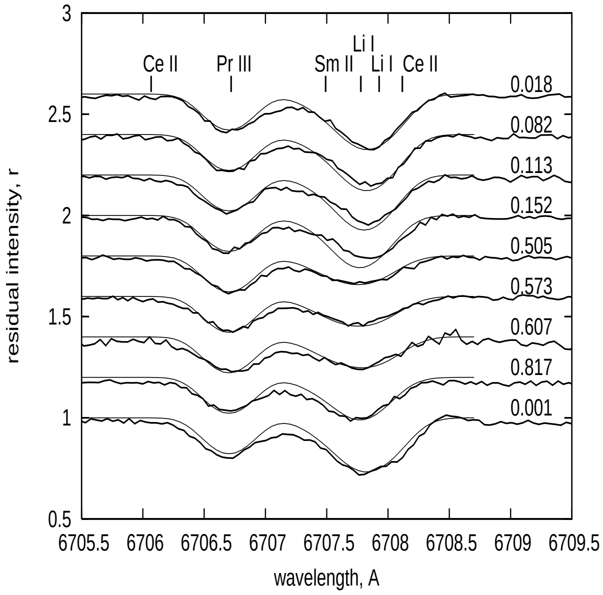


Рис. 1. Наблюденные (жирная линия) и модельные (7750/4.2) спектры HD 12098 в области 6705.5–6708.5 Å для девяти наблюденных фаз вращения (указаны справа)

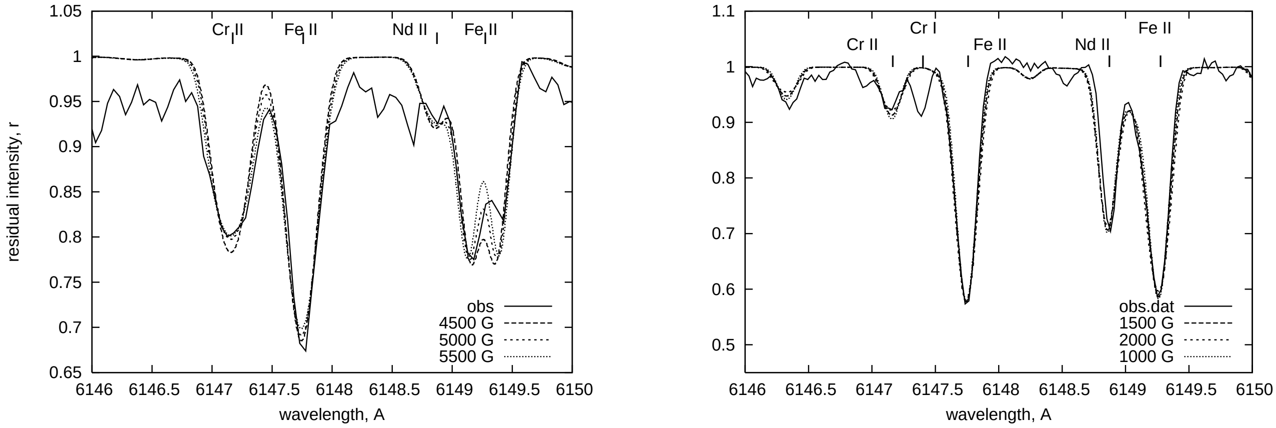
девяти наблюденных фаз (0.001–0.817). Вместо двух пятен лития [17] новый анализ показал наличие трех пятен лития, одно из которых совпадает с положением одного полюса магнитного поля, два других расположены вблизи другого полюса, симметрично относительно него. Возможно, магнитное поле звезды имеет более сложную структуру, чем диполь [17], и его модель должна быть пересчитана с учетом новых наблюдений. В таблице 1 приводятся долгота и широта пятна в экваториальных координатах, радиус пятна и содержание лития в пятне $\varepsilon\,(\mathrm{Li})$. Совмещение наблюденных профилей бленды 6708 Å для девяти фаз вращения с модельными для параметров пятен из таблицы 1 показано на рис. 1. Содержание лития в пятнах превышает космическое. Оно может быть объяснено диффузией лития в присутствии магнитного поля или образованием лития в реакциях "скалывания" на поверхности звезды вблизи полюсов магнитного поля (см., например, [4]).

Таблица 1. Параметры литиевых пятен

N	Долгота	Широта	R	$\varepsilon\,(\mathrm{Li})$
1	30°	–20°	40°	5.0
2	180°	25°	70°	4.2
3	290°	–25°	40°	4.4

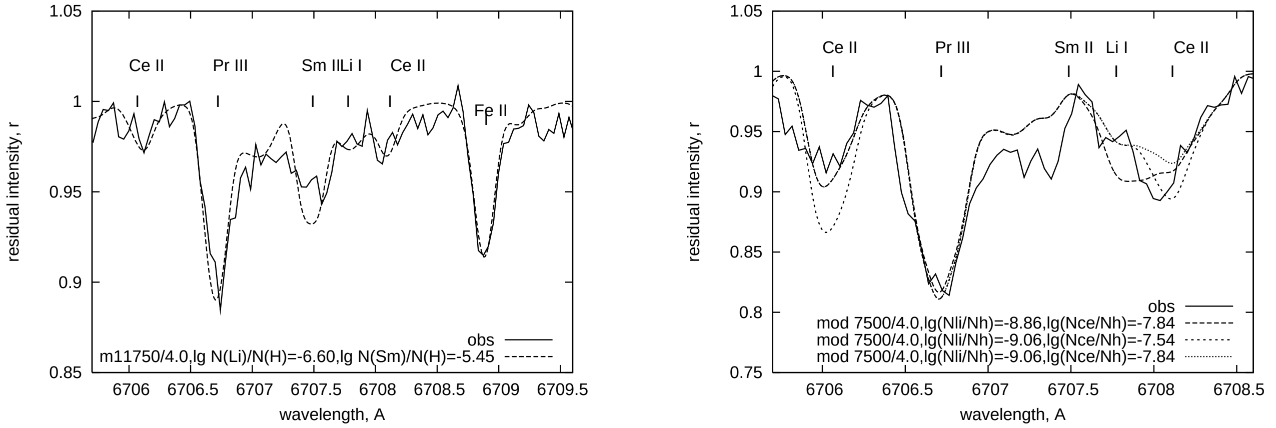
ЗВЕЗДА HR 465

Звезда HR 465 (HD 9996) обнаруживает переменность спектра с периодом 23 года (Престон [11]). Ее наблюдения были сделаны А. Ю. в 2004 году с эшельным спектрографом BOES [`http://www.boao.re.kr/BOES/`] на 1.8-м телескопе Богунсанской астрономической обсерватории (BOAO) в Корее ($R = 80\,000$, $S/N > 150$, область спектра 3780–9500 Å). Кроме того, мы использовали спектр этой звезды из спектральной базы данных ELODIE [`http://www.obs-hp.fr/archive/archive.html`]. Эти спектры, разделенные примерно полупериодом вращения, показывают так называемые фазу хрома с усиленными линиями хрома (спектр из базы ELODIE) и фазу редкоземельных элементов (REE) с усиленными линиями REE. По профилям ионизованного железа 6148 и 6150 Å мы определили величины поверхностного магнитного поля B_s в двух фазах, которые были необходимы для моделирования профиля бленды 6708 Å. Они составили 4500–5000 Гс для спектра ELODIE и 1500–2000 Гс для спектра BOES (рис. 2 *а* и 2 *б* соответственно). Эффективная температура и ускорение силы тяжести для звезды HR 465 были определены в работе V. Yushchenko и др. [18] на основании эквивалентных ширин линий нейтрального и ионизованного железа: $T_{\text{эф}} = 11840$, $\lg g = 4.3$. Для моделирования спектра BOES, который показывает усиленные линии REE и лития, мы использовали близкую по параметрам модель 11750/4.0 из сетки Куруца [8], список линий VALD [7] и некоторые дополнительные блендирующие REE-линии, рассчитанные авторами [16]. Мы нашли содержание лития $\varepsilon\,(\mathrm{Li}) = 5.40$, которое на 2 порядка превышает "космическое" содержание лития, содержание церия $\varepsilon\,(\mathrm{Ce}) = 6.99$ и верхний предел содержания самария $\varepsilon\,(\mathrm{Sm}) = 6.55$. Две последние величины значительно (более 5 порядков) превышают солнечные содержания



а б

Рис. 2. Наблюденный (жирная линия) в фазе “хрома” и модельные (11750/4.0) спектры HR 465 в области 6147–6150 Å (*а*). Наблюденный (жирная линия) в фазе “REE” и модельные (11750/4.0) спектры HR 465 в области 6147–6150 Å (*б*)



а б

Рис. 3. Наблюденный (жирная линия) в фазе “REE” и модельные (11750/4.0) спектры HR 465 в области 6705.5–6708.5 Å (*а*). Наблюденный (жирная линия) и модельные (7500/4.0) спектры HD 965 в области 6705.5–6708.5 Å для граничных содержаний Li и Ce (указаны в рисунке) (*б*)

церия и самария. Заметим, что для описания профиля линии Fe II 6708.885 Å мы были вынуждены использовать разрешение в спектре $R = 50\,000$ вместо 80 000 и содержание железа $\varepsilon\,(\mathrm{Fe}) = 8.90$, что более чем на порядок выше солнечного (рис. 3). На рис. 3 мы видим раздвоение линий лития и REE, по-видимому, обусловленное пятнистой структурой поверхности звезды.

ЗВЕЗДА HD 965

Наблюдаемый спектр магнитной пекулярной звезды HD 965 спектрального класса A5p (SIMBAD, [`http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/`]) был получен А. Ю. с эшельным спектрографом BOES на 1.8-м телескопе Богунсанской астрономической обсерватории (BOAO) в Корее, в декабре 2004 года. HD 965 – это медленно вращающаяся Ap-звезда с сильным магнитным полем: поверхностное магнитное поле $B_s = 4400$ Гс было определено в работе Матиса и др. [9]. Период вращения составляет более 10 лет (Елкин и др. [2]). Параметры $T_{\text{эф}} = 7500$, $\lg g = 4.0$ и $v \sin i = 3$ км/с, необходимые для построения модельного профиля бленды Li I 6708 Å, были взяты из работы Рябчиковой и др. [13]. Методом синтетического спектра с учетом магнитного поля по программе Хана SYNTHM [5] на основе модели атмосферы 7500/4.0 из сетки Куруца [8] с учетом линий из списка VALD и некоторых дополнительных блендирующих REE-линий, рассчитанных авторами [16], были рассчитаны профили бленды 6708 Å, составленной из линий дублета лития 6707.8 и линии Ce II 6708.1 Å. Сравнением наблюденного спектра звезды HD 965 с рассчитанными были определены границы содержаний лития и церия, а именно $\varepsilon\,(\mathrm{Li}) = 2.90$–$3.09$, что близко к “космическому” содержанию лития. По-видимому, сильное магнитное поле предотвратило перемешивание и разрушение первоначального лития. Содержание церия лежит в пределах $\varepsilon\,(\mathrm{Ce}) = 3.85$–$4.27$, что почти на 3 порядка превышает солнечную величину. Заметим, что линии обоих элементов в спектре этой звезды показывают пятенную структуру, связанную, по-видимому, с двумя полюсами магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый анализ спектров недавно открытой звезды северного неба HD 12098 показал наличие трех пятен лития, одно из которых совпадает с положением одного полюса магнитного поля, два других расположены вблизи другого полюса, симметрично относительно него. Возможно, магнитное поле звезды имеет более сложную структуру, чем диполь [17], и его модель должна быть пересчитана с учетом новых наблюдений. Повышенное содержание лития в пятнах на поверхности этой быстровращающейся звезды и в атмосферах двух других медленно вращающихся Ap-звезд (HR 465 и HD 965) может быть обусловлено физическими процессами, препятствующими перемешиванию звездного вещества и сохранению в атмосфере его первоначального высокого содержания, а именно, подавлением конвекции магнитным полем, в сочетании с диффузией лития, направленной к поверхности звезд. Другая возможность – это реальные процессы возникновения лития в поверхностных слоях атмосфер, например в реакциях “скалывания”, при которых ускоренные в магнитных полях протоны и альфа-частицы разрушают более тяжелые атомы C, N, O с образованием лития. Такая возможность показана в теоретической работе Гориэли [4] для звезды Пшибыльского (roAp-звезда с большим избытком REE).

Мы благодарим В. Цымбала и С. Хана за возможность использовать их программы ROTATE и SYNTHM.

[1] *Шаврина А. В., Полосухина Н. С., Драке Н. А., Кудрявцев Д.* Аномальное содержание лития в недавно открытой осциллирующей roAp-звезде северного полушария неба HD 12098 // Астрофизика. – 2008. – **51**, № 4. – С. 607–615.

[2] *Elkin V. G., Kurtz D. W., Mathys G., et al* High time resolution spectroscopy and magnetic variability of the cool Ap star HD 965 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2005. – **358**, N 3. – P. 1100–1104.

[3] *Girish V., Seetha S., Martinez P., et al.* HD 12098 – A new northern hemisphere roAp star // Astron. and Astrophys. – 2001. – **380**, N 1. – P. 142–147.

[4] *Goriely S.* Nucleosynthesis by accelerated particles to account for the surface composition of HD 101065 // Astron. and Astrophys. – 2007. – **466**, N 2. – P. 619–626.

[5] *Khan S.* The code of spectrum synthesis in atmospheres of Ap stars // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. – 2004. – **88**, N 1. – P. 71–81.

[6] *Kochukhov O., Bagnulo S.* Evolutionary state of magnetic chemically peculiar stars // Astron. and Astrophys. – 2006. – **450**, N 2. – P. 763–775.

[7] *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**, N 1. – P. 119–133.

[8] *Kurucz R. L.* Data Bank. –1993. – CD-ROM, **1–22**.

[9] *Mathys G., Hubrig S., Landstreet J. D., et al.* The mean magnetic field modulus of AP stars // Astron. and Astrophys. – 1997. – **323**, N 3. – P. 881–885.

[10] *Панчук В., Пискунов Н., Клочкова В. и др.* Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. – Preprint SAO, 2002.

[11] *Preston G. W., Wolff S. C.* The Very Slow Spectrum, Magnetic, and Photometric Variations of HD 9996 // Astrophys. J. – 1970. – **160**, N 4. – P. 1071–1076.

[12] *Ryabchikova T., Wade G., Auriere M., et al.* Rotational periods of four roAp stars // Astron. and Astrophys. – 2005. – **429**, N 1. – P. L 55–L58.

[13] *Ryabchikova T., Kochukhov O., Bagnulo S.* Isotopic anomaly and stratification of Ca in magnetic Ap stars // Astron. and Astrophys. – 2008. – **480**, N 3. – P. 811–823.

[14] *Schaller G., Schaerer D., Meynet G., Maeder A.* New grids of stellar models from 0.8 to 120 solar masses at $Z = 0.020$ and $Z = 0.001$ // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1992. – **96**. – P. 269–331.

[15] *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.

[16] *Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Pavlenko Ya. V., et al.* The spectrum of the roAp star HD 101065 (Przybylski's star) in the Li I 6708 Å spectral region // Astron. and Astrophys. – 2003. – **409**, N 3. – P. 707–713.

[17] *Shavrina A. V. , Glagolevskij Yu. V., Drake N. A., et al.* Lithium spots in the Northern roAp star HD 12098 // Odessa Astron. Publ. –2008. – **21**. – P. 111–114.

[18] *Yushchenko V., Gopka V., Yushchenko A., et al.* Atmospheric parameters and chemical composition of peculiar stars HR 465, HD 91375, and HD 25354 // Odessa Astron. Publ. – 2008. – **21**. – P. 153–157.