

АНОМАЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЛИТИЯ В НЕДАВНО  
ОТКРЫТОЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ  $\text{гоAr}$  ЗВЕЗДЕ  
СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ НЕБА HD 12098А.В.ШАВРИНА<sup>1</sup>, Н.С.ПОЛОСУХИНА<sup>2</sup>, Н.А.ДРАКЕ<sup>3</sup>,  
Д.О.КУДРЯВЦЕВ<sup>4</sup>

Поступила 21 мая 2008

Принята к печати 20 августа 2008

По спектральным наблюдениям  $\text{Ar-CP}$  звезд на БТА (САО РАН) с эшелле-спектрометром "NES" было обнаружено несколько звезд с аномальным содержанием лития. Среди этих звезд следует особо отметить осциллирующую звезду HD12098, первую  $\text{гоAr}$  звезду на северном полушарии неба. В спектре этой звезды была обнаружена сильная и переменная линия лития  $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ . Для проведения уверенного анализа методом доплеровского картирования недостаточно наблюдений, но тем не менее достаточно, чтобы сделать предположение о наличии литиевых пятен на поверхности этой звезды, аналогично  $\text{гоAr}$  звездам HD 83368 и HD 60435, для которых ранее уверенно были обнаружены на поверхности звезды пятна высокого содержания лития. Методом синтетического спектра на основе моделей атмосфер с учетом линий из списка VALD и некоторых дополнительных блендирующих REE линий, рассчитанных авторами, выбраны параметры модели атмосферы. Расчеты профиля литиевой бленды  $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$  с учетом магнитного поля были выполнены, используя программу SYNTHM. Для двух фаз вращения звезды HD 12098 определено содержание лития, которое является аномально высоким, в сравнении с солнечным содержанием, и метеоритным. Значительное различие содержания лития в двух фазах (в двух различных областях на поверхности звезды) более чем на 0.5 dex, очень близко к таковому, которое мы получили в результате анализа спектров  $\text{гоAr}$  звезд HD 83368 и HD 60435. Таким образом, обнаружена еще одна  $\text{гоAr}$  звезда HD 12098 с литиевыми пятнами на поверхности.

Ключевые слова: *звезды: содержание лития - объект: HD 12098*

1. *Введение.* Литий является одним из первоначальных элементов Вселенной, содержание которых тесно связано с эволюцией звезд. Проблема интерпретации наблюдаемых величин содержания лития в звездных атмосферах является одной из загадок современной астрофизики по причине разнообразия содержания этого элемента у звезд, близких по своим физическим параметрам.

Проблема лития в химически пекулярных (CP) звездах была предметом многочисленных дебатов. Обилие индивидуальных особенностей этих звезд и дефицит спектральных наблюдений в области резонансного дублета лития  $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$  - главная причина противоречивых результатов наблюдений лития в CP-звездах.

Наиболее уверенные результаты в исследованиях лития в  $\text{Ar-CP}$  звездах были достигнуты в результате Международного Проекта (1996-2006гг.)

"Lithium in magnetic CP stars". Используя телескопы ЗТШ (2.6-м), CAT (1.5м ESO), FEROS (ESO) и др. телескопы мира, были проведены систематические наблюдения в области лития 6708 Å и изучено поведение профиля линии лития 6708 Å с фазой вращения. В результате проведенных серий наблюдений осциллирующих гоАр-CP звезд HD 83368, HD 60435 и HD 3980, обнаруженные значительные доплеровские сдвиги линии лития LiI 6708 Å привели к открытию запятненности литием поверхности этих звезд [1].

Быстро осциллирующие (гоАр) звезды - это холодные магнитные химически пекулярные CP-звезды с периодами пульсаций в диапазоне 6-16 мин, амплитудами изменений блеска порядка  $0^m.008$ . Большая часть обнаруженных гоАр звезд расположена в южном полушарии. Последние годы активизировались работы по поиску гоАр звезд в северной части неба, и первой гоАр звездой, открытой на северном небе, стала HD 12098. Эта звезда интенсивно наблюдалась с 2000г. на обсерваториях SAAO (Южная Африка) и UPSO (Индия) в рамках совместного проекта [2,3]. HD 12098 - классифицируется как F0- звезда с  $m_v = 7.97$ .

*Анализ фотометрических данных* HD12098 позволил выделить две частоты осцилляций:  $\nu_1 = 2.17385$  и  $\nu_2 = 2.18069$  мГц. Комбинируя эти данные с наблюдениями, полученными ранее [3], было найдено, что модуляция амплитуды пульсаций в различные ночи происходит с периодом 1.22 дня [4].

Дополнительные фотометрические наблюдения привели к необходимости пересмотреть предложенный в [4] период вращения звезды  $P_{rot} = 1.22$  дня, и в работе [5] приводится величина  $P_{rot} \sim 5.4$  дня. Амплитудный спектр кривой блеска с максимумом в 2.18 мГц соответствует периоду осцилляций  $P_{os} = 7.67$  мин [5]. Временные изменения амплитуды пульсаций блеска наблюдаются во многих гоАр звездах. Эта модуляция может быть объяснена в рамках модели наклонного пульсатора. В этой модели пульсационная и магнитная оси наклонены по отношению к оси вращения звезды. Вращательная модуляция амплитуды пульсаций происходит в результате эффекта ориентации, ведущего к периодическому изменению угла между осью пульсаций и лучом зрения, что типично для гоАр звезд.

Период вращения этой звезды порядка нескольких дней. Имеющиеся фотометрические данные о блеске не позволили уверенно выбрать один из возможных вращательных периодов - 1.2 дня или 5.4 дня.

*Результаты наблюдений магнитного поля.* Измерения магнитного поля HD 12098 и некоторых других гоАр звезд были получены, используя данные наблюдений современного спектрополяриметра MuSiCoS на 2-м телескопе обсерватории Pic du Midi [6]. На основе этих наблюдений в работе Рябчиковой и др. [7] был определен вращательный период  $P_{rot} = 5.460 \pm 0.001$  дней для HD12098 по 17 новым измерениям магнитного

поля  $B_z$  с использованием многоэлементной маски, преимущественно для линий CrII и FeI, которые показали четкие изменения магнитного поля HD 12098 с периодом 5.460 дней (рис.1a). Эфемериды для расчета фаз магнитного поля  $B_z$  представлена в [7] формулой:

$$HJD(BZ)_{\max} = 2451889.42(2) + 5.460 \cdot E.$$

Используя полученную эфемериду, мы построили фазовую зависимость фотометрических амплитуд пульсаций из наблюдений [5], согласно периоду вращения 5.46 (рис.1b).

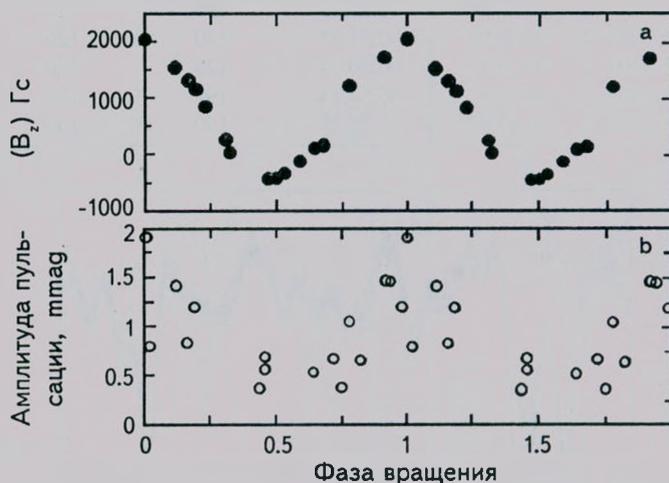


Рис.1. HD 12098 - среднее продольное магнитное поле  $B_z$  (a) и изменения амплитуды пульсаций  $\Delta m \text{ mag}$  (b). Рисунок взят из [7].

Куртц [8] предложил модель магнитного пульсатора, в которой звездные пульсации симметричны относительно магнитной оси. В этой модели амплитуда пульсаций увеличивается вдоль магнитного поля, достигая максимума в полярных областях, и минимальна у магнитного экватора, т.е. амплитуда пульсаций меняется в фазе с магнитным полем.

Рис.1 показывает, что изменения амплитуды пульсаций коррелируют с изменениями продольного магнитного поля с периодом 5.46 дня.

2. *Первые предварительные результаты наблюдений HD 12098 в спектральной области лития Li I 6708 Å.* Мы начали наблюдения HD 12098 в 2005г. на 6-м телескопе (CAO) с целью поиска дублета лития Li I 6708 Å, и изучения поведения этой линии с фазой вращения. Наблюдения выполнялись с эшелле-спектрометром "NES" [9] в спектральной области 6000-6800 Å с отношением  $S/N$  (110 - ~190) и спектральным разрешением  $R \sim 45000$ . Для обработки спектров использовался пакет программ "REDUCE" Н.Пискунова и др. [10].

Данные о наблюдениях приведены в табл.1.

На рис.2 приведены все спектры HD 12098, полученные в 2005-2006гг.

(16.05.2005, 19.08.2005 и 9.07.2006.). Линии лития Li I 6708 Å, дважды ионизованного празеодима Pr III 6706.7 Å и нейтрального кальция Ca I 6717.6 - самые выразительные линии на этом участке спектра.

Таблица 1

## ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

Nsp	Дата	UT начало	UT конец	S/N (6150)	S/N (6708)	Фаза
sp22	9.07.2006	22.32.26	23.03.44	140	110	0.0819
sp23	9.07.2006	23.06.36	23.37.55	150	120	0.0866
sp36	16.05.2006	23.50.09	00.21.28	140	120	0.0181
sp37	16.05.2006	00.24.15	00.50.34	120	120	0.0222
sp82	19.08.2005	00.22.55	00.54.14	190	160	0.5727
sp83	19.08.2005	00.57.32	01.21.28	150	140	0.5767

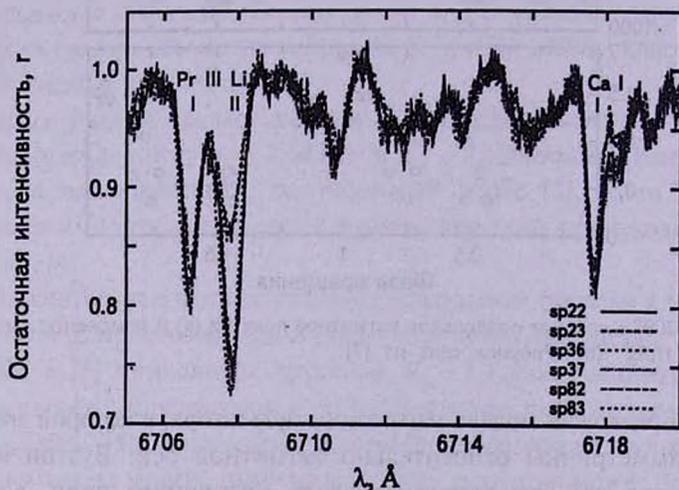


Рис.2. Спектры HD 12098, полученные в 2005-2006гг. (16.05.2005, 19.08.2005 и 9.07.2006, см. таблицу) в спектральной области 6700-6720 Å.

Сразу было замечено удивительное сходство этой звезды с тремя изученными нами ранее гоАр звездами с переменной линией лития 6708 Å, HD 83368 и HD 60435 [11]. Поведение линии лития для этих звезд было интерпретировано двумя пятнами лития на магнитных полусах вращающихся звезд [1], моделированием определены размеры пятен и их положение на поверхности звезд [11]. Для сравнения на рис.3 приведены спектры HD 60435 и HD 12098 в области лития 6708 Å для фаз вращения вблизи 0.0 и 0.5.

Видна значительная переменность линии Li I 6708 Å и менее выразительная - в линии Pr III 6706.7 Å для обеих звезд.

Как отмечено в нескольких работах, линия Pr III (6706.7 Å) является индикатором гоАр звезд. Также характерной особенностью гоАр звезд с дипольным магнитным полем является наличие обеих линий (Li I 6708. Å

и Pr III 6706.7 Å) в их спектрах.

Используя для анализа программу ROTATE Цымбала [13], позволяющую рассчитывать спектры с учетом пятенной структуры на поверхности звезды для разных фаз вращения, и программу SYNTHM Хана [14], учитывающую расщепление спектральных линий в магнитном поле, мы сделали первую попытку оценить содержание лития в пятнах, расположенных вблизи магнитных полюсов звезды, используя всего лишь спектры звезды для 3-х фаз вращения звезды, из которых 2 фазы (наблюдения в мае и июле 2006г.) практически совпадают.

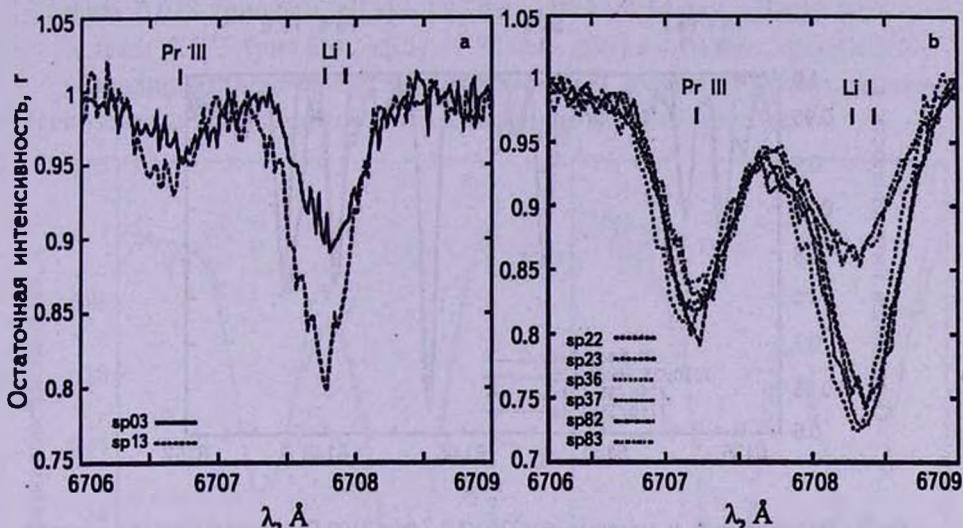


Рис.3. Спектры HD 60435 (a) и HD 12098 (b) в области линии лития 6708 Å для фаз вращения вблизи 0.0 и 0.5.

3. *Моделирование и анализ спектра HD 12098 в области дублета лития Li I 6708 Å.* Первым шагом анализа был подбор модели атмосферы звезды по области спектра 6110–6170 Å, содержащей линии Fe I и Fe II с помощью программы SYNTHM [14]. При этом производилась также оценка величины поверхностного магнитного поля  $H_s$  и величины  $V \sin i$  по линиям Fe II 6103, 6147 и 6149 Å. При этом мы столкнулись с необходимостью учета линий редкоземельных элементов (REE), дополнительных к спискам VALD [15] и DREAM [16], длины волн которых были рассчитаны нами на основании энергий уровней NIST [17]. На рис.4 показано совмещение наблюдаемого и двух модельных спектров, рассчитанных с включением этих дополнительных линий REE и без их учета.

Учет дополнительных линий REE позволил лучше описать наблюдаемый спектр HD 12098 и привел к понижению эффективной температуры модели атмосферы с 7750 К до 7250 К. Отметим, что аналогичная процедура для HD 60435 также привела к понижению температуры модели атмосферы

с 8250 К, как в статье [11], до 7750 К. Величина поверхностного магнитного поля (модуль поля)  $B_s$  была оценена как 2100 Гс,  $v \sin i = 15$  км/с, рис.5а. Для сравнения на рис.5б мы показываем также линии Fe II 6147 и 6149 Å для HD 60435 с подобранными величинами  $B_s = 2000$  Гс и  $v \sin i = 11$  км/с.

Отметим, что в работе [12] для HD 12098 подобраны модель 7800/4.3,  $v \sin i = 10 \pm$  км/с и  $B_s \sim 6500$  Гс по спектру лучшего спектрального разрешения  $R = 115000$ . Отличие от наших параметров можно объяснить не только меньшим разрешением, но и неучтенными в [12] дополнительными к списку VALD REE линиями. Отметим также, что определение параметра

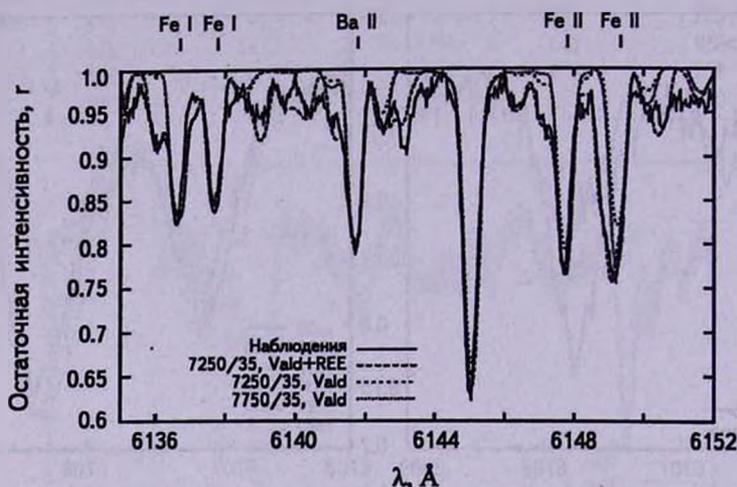


Рис.4. Наблюдаемый и модельный (7250/3.5,  $B_s = 2100$  Гс,  $v \sin i = 15$  км/с) спектры HD 12098 в области 6135-6152 Å. При использовании списка VALD без дополнительных линий REE лучшая модель -7750/3.5.

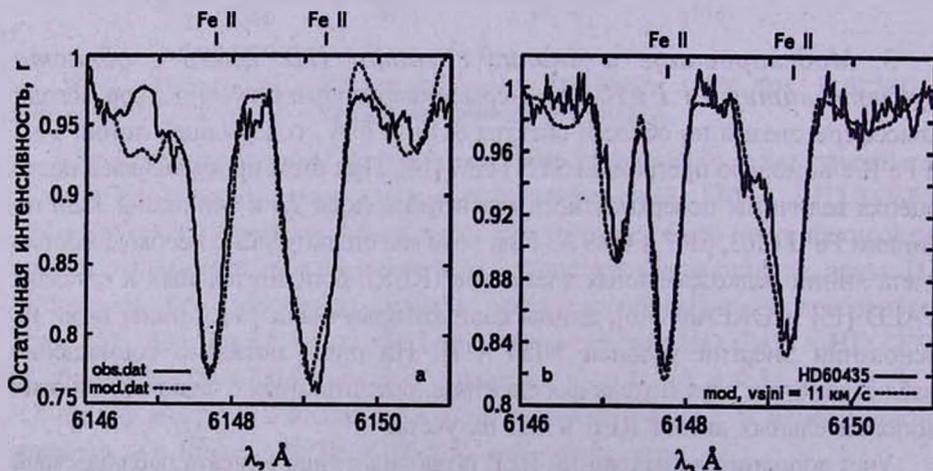


Рис.5. Величина поверхностного магнитного поля (модуль поля)  $B_s$  для HD 12098 была оценена по линиям Fe II 6147 Å и 6149 Å как 2100 Гс,  $v \sin i = 15$  км/с (рис.5а). На рис.5б мы показываем для сравнения также линии Fe II 6147 и 6149 Å для HD 60435 с подобранными величинами  $B_s = 2000$  Гс и  $v \sin i = 11$  км/с.

$v \sin i$ , даже по "немагнитным" линиям затруднено пятненным распределением большинства элементов по поверхности гоАр звезд. А от этого параметра драматически зависит определяемая по магнитным линиям величина поверхностного магнитного поля  $B_s$ .

Мы рассчитали профили линий Pr III 6706.7 и Li I 6708 Å для двух фаз 0.018 и 0.573 с учетом магнитного расщепления (программа SYNTHM [14]), предполагая, что для этих фаз литий и дважды ионизованный празеодим равномерно распределены в пятнах. На рис.6 показаны профили Pr III 6706.7 и Li I 6708 Å для этих двух фаз:

фаза 0.018 (рис.6a):  $\epsilon(\text{Li}) = 3.93 \text{ dex}$ ,  $\epsilon(\text{Pr}) = 4.54 \text{ dex}$ ,  $\epsilon(\text{Sm}) = 3.96$

и фаза 0.573 (рис.6b):  $\epsilon(\text{Li}) = 3.38 \text{ dex}$ ,  $\epsilon(\text{Pr}) = 4.74 \text{ dex}$ ,  $\epsilon(\text{Sm}) = 3.79$

(блендирование линией самария 6707.473 Å, а также другими линиями редкоземельных элементов учитывалось при моделировании).

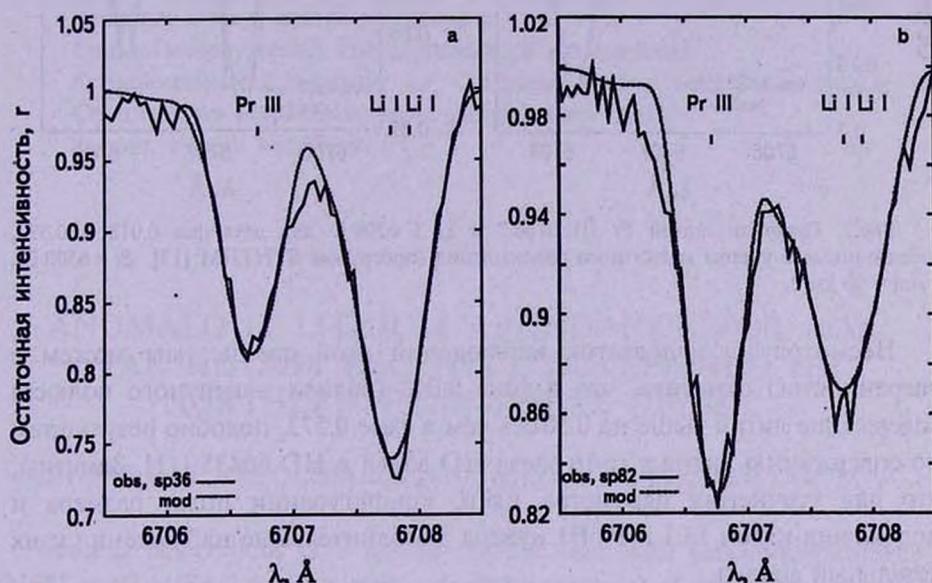


Рис.6. Профили Pr III 6706.7 и Li I 6708 Å для двух фаз 0.018 и 0.573, рассчитанные с учетом магнитного расщепления (программа SYNTHM [13]) для  $v \sin i = 15 \text{ км/с}$ ,  $B_s = 2100 \text{ Гс}$ .

Мы также рассчитали профили линий Li I 6708 Å и Pr III 6706.7 Å с параметрами  $v \sin i = 10 \text{ км/с}$  и магнитном поле  $B_s = 6500 \text{ Гс}$  при разном содержании элементов для этих двух фаз (рис.7):

фаза 0.018:  $\epsilon(\text{Li}) = 3.88 \text{ dex}$ ,  $\epsilon(\text{Pr}) = 4.14 \text{ dex}$ ,  $\epsilon(\text{Sm}) = 4.04 \text{ dex}$

фаза 0.573:  $\epsilon(\text{Li}) = 3.38 \text{ dex}$ ,  $\epsilon(\text{Pr}) = 4.14 \text{ dex}$ ,  $\epsilon(\text{Sm}) = 3.84 \text{ dex}$

В обоих случаях мы получили сходное содержание лития  $\epsilon(\text{Li}) = 3.93$  и  $3.88$  для фазы 0.018, и одинаковое  $\epsilon(\text{Li}) = 3.38$  для фазы 0.573. (Блендирование линией самария 6707.473 Å, а также другими линиями редкоземельных элементов учитывалось при моделировании).

Следует заметить, что полученное содержание лития существенно отличается от солнечного  $\varepsilon(\text{Li}) = 1.05 \pm 0.10$  dex содержания лития и метеоритного  $\varepsilon(\text{Li}) = 3.25 \pm 0.06$  [18].

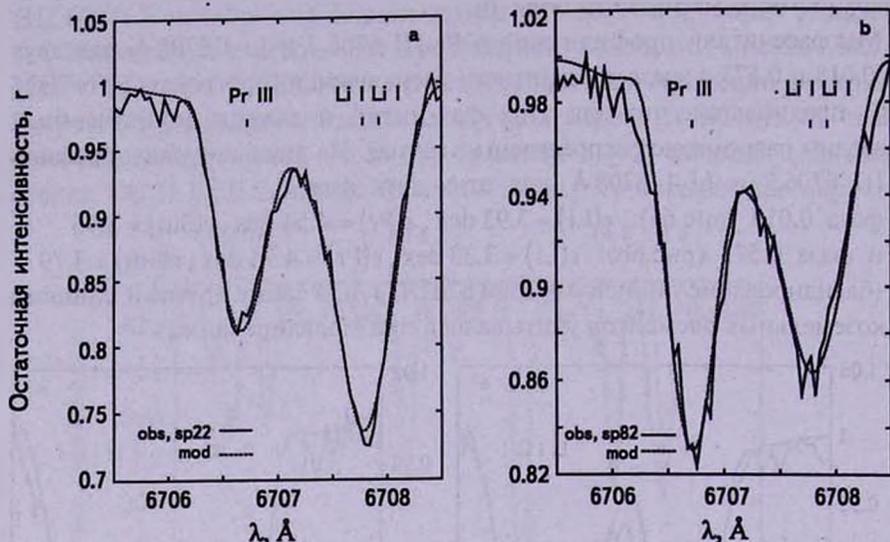


Рис.7. Профили линий Pr III 6706.7 и Li I 6708 Å для двух фаз 0.018 и 0.573, рассчитанные с учетом магнитного расщепления (программа SYNTHM [13]).  $B_z = 6500$  Гс,  $v \sin i = 10$  км/с.

Несмотря на недостаток наблюдений этой звезды, мы можем с уверенностью отметить, что в фазе 0.018 (вблизи магнитного полюса) содержание лития выше на 0.50 dex чем в фазе 0.573, подобно результатам по содержанию лития у  $\alpha$ Ap звезд HD 83368 и HD 60435 [11]. Заметим, что для уточнения параметра  $v \sin i$ , конфигурации поля, размера и положения пятен Li I и Pr III нужны дополнительные наблюдения и их детальный анализ.

**4. Заключение.** HD 12098 явилась новой  $\alpha$ Ap звездой, дополнившей группу I CP-звезд с переменной линией лития Li I 6708 Å. Имеющиеся наблюдения спектров на БТА (3 ночи) для 2-х фаз вращения (период 5.5 дней) показали сильные изменения в линии лития. Предполагая, что поведение линии лития подобно таковому в спектрах HD 83368 и HD 60435 [11], мы промоделировали спектры HD 12098 для двух противоположных фаз максимальной и минимальной интенсивности линии лития 6708 Å и определили усредненное по видимой поверхности звезды (или пятен) содержание лития и празеодима с помощью программы SYNTHM [14]. Наши оценки содержания лития значительно выше солнечного (более, чем на 2 dex) и выше, чем содержание лития в метеоритах [18]. Причиной повышенного содержания лития вблизи полюсов дипольного магнитного поля могут быть как диффузия

химических элементов в CP-звездах [19], так и известные реакции скалывания (spallation reactions) на поверхности звезды. Результаты можно рассматривать как предварительные. Для более точного моделирования пятен необходимы дальнейшие наблюдения HD12098, чтобы обеспечить более полное покрытие фаз по всему периоду вращения.

Авторы благодарят В.Цымбала и С.Хана за возможность работать с программами ROTATE и SYNTHM.

Авторы благодарны Л.С.Любимкову за интерес к работе и ценные замечания.

<sup>1</sup> Главная Астрономическая обсерватория НАНУ,  
Украина, e-mail: shavrina@mao.kiev.ua

<sup>2</sup> НИИ Крымская астрофизическая обсерватория,  
Украина, e-mail: polo@krao.crimea.ua

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский Государственный университет,  
Астрономический институт им. Соболева, Россия e-mail: drake@on.br

<sup>4</sup> Специальная астрономическая обсерватория РАН,  
Россия, e-mail: kudr@sao.ru

## ANOMALOUS LITHIUM ABUNDANCE FOR roAp STAR HD12098 RECENTLY DISCOVERED ON NORTHERN HEMISPHERE OF SKY

A.SHAVRINA<sup>1</sup>, N.POLOSUKHINA<sup>2</sup>, N.DRAKE<sup>3</sup>, D.KUDRYAVTSEV<sup>4</sup>

Spectral observations of a number Ap-CP stars with echelle-spectrometer "NES" at BTA (SAO RAS) permit us to discover several of them with abnormal (enhanced) lithium abundance. Among these stars we must especially distinguish one rapidly oscillating star HD 12098. It was the first roAp star found on northern hemisphere of the sky. The strong and variable lithium line Li I 6708 Å was detected in the spectrum of this star. There is a lack of HD 12098 observations to carry out the reliable analysis using method Doppler imaging, nevertheless we can assume the existence of lithium spots on the surface of this star similar to other roAp stars HD 83368 and HD 60435 with lithium spots. The method of synthetic spectrum using Kurucz's model atmospheres and line list from VALD and some additional blending REE lines, calculated by authors, was applied to define the model atmosphere parameters of HD 12098. Calculations of Li I 6708 Å blend profile taking into account magnetic field were carried out with SYNTHM code. For two rotation phases of HD 12098 the lithium abundance was estimated,

which reveals anomalously high in the comparison with solar and meteoritic abundance of lithium. The considerable difference in lithium abundance in two opposite rotational phases corresponding two different regions on the star surface is more than 0.5 dex, that is similar to the lithium abundance obtained from the spectra analysis of two other roAp stars, HD 83368 and HD 60435. Thus the new roAp star HD12098 with lithium spots on the surface is discovered.

Key words: *stars: lithium abundance - individual:HD 12098*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *N.Polosukhina, D.Kurtz, M.Hack et al.*, *Astron. Astrophys.*, **351**, 283, 1999.
2. *V.Girish, S.Joshi, S.Seetha et al.*, *Bull. Astr. Soc. India*, **29**, 305, 2001.
3. *S.Seetha, U.Chaubey, V.Girish et al.*, *Bull. Astr. Soc. India*, **29**, 309, 2001.
4. *V.Girish*, *J. Astrophys. Astr.*, **26**, 203, 2005.
5. *V.Girish, S.Seetha, P.Martinez et al.*, *Astron. Astrophys.*, **380**, 142, 2001.
6. *J.Donati, C.Catala, G.Wade et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **134**, 149, 1999.
7. *T.Ryabchikova, G.Wade, M.Aurière et al.*, *Astron. Astrophys.*, **429**, L55, 2005.
8. *D.Kurtz*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **200**, 807, 1982.
9. *В.Панчук, Н.Пискунов, В.Клочкова, В.Юшкин, С.Ермаков*, *Препринт САО*, **169**, 2002.
10. *N.Piskunov, J.Valenti*, *Astron. Astrophys.*, **385**, 109, 2002.
11. *A.Shavrina, N.Polosukhina, J.Zverko et al.*, *Astron. Astrophys.*, **372**, 571, 2001.
12. *T.Ryabchikova, N.Nesvacil, W.Weiss, O.Kochukhov, Ch.Stütz1*, *Astron. Astrophys.*, **423**, 705, 2004.
13. *V.Tsymbal*, in *Model Atmospheres and Spectrum Synthesis*, eds. S.Adelman, F.Kupka, W.Weiss, 5<sup>th</sup> Vienna Workshop, ASP Conf. series, **108**, 198, 1996.
14. *S.Khan, J.Quant*, *Spectr. and Radiat. Transf.*, **88**, 71, 2004.
15. *F.Kupka, N.Piskunov, T.Ryabchikova, H.Stempels, W.Weiss*, *A&AS*, **138**, 119, 1999.
16. *E.Biémont, P.Palmer, P.Quinet*, *D.R.E.A.M. Database on Rare Earth at Mons. Univ.*; <http://www.umh.ac.be/~astro/dream.shtml>.
17. <http://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/energy1.pl>
18. *M.Asplund, N.Grevesse, A.Sauval*, *ASPC*, **336**, 25A, 2005.
19. *G.Michaud*, *Astron. J.*, **85**, 89, 1980.