НЕКОТОРЫЕ ИНТЕРЕСНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ (CP) ЗВЕЗД В ОБЛАСТИ РЕЗОНАНСНОГО ДУБЛЕТА ЛИТИЯ LI I (6708 Å) НА БТА (САО РАН)

Н. Полосухина[1], А. Шаврина[2], Н. Драке[3], Д. Кудрявцев[4], М. Смирнова[1]

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

[2] *Главная астрономическая обсерватория, Украина*
e-mail: shavrina@mao.kiev.ua

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

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

Открытие Кирхгофом метода спектрального анализа 150 лет назад ознаменовало появление нового направления в астрономии – астрофизики (1859–1862 гг.). В 1859 году Г. Кирхгофом в спектре Солнца были найдены и идентифицированы линии Na, Ca, Mg, Cr, Cu, Zn, Ba, Ni. Так впервые в истории были идентифицированы линии химических элементов в астрономических спектрах. Именно Кирхгоф обнаружил и слабые признаки линии Li I 6708 Å в солнечном спектре. Однако эта линия была хорошо видна только в солнечных пятнах, и впервые это было замечено в 1907 г. Хейлом и Адамсом [6] Поведение линии лития особенно интересно в спектрах CP-звезд с магнитными полями – широкий диапазон содержания лития для физически подобных CP-звезд является до сих пор загадкой. Результаты исследований лития, полученные в КрАО (Полосухина, 1973–1976 гг. [1, 2]), легли в основу Международного проекта “Литий в CP-звездах с магнитными полями”. Систематические наблюдения в рамках этого проекта проводились с 1996 г., используя телескопы КраО (ЗТШ), ESO (CAT, FEROS). В настоящее время этот проект включен в программу БТА (6-м). В статье рассматриваются вопросы выявления переменности линии лития в CP-звездах.

ВВЕДЕНИЕ

Отмечая 150-летие открытия Г. Кирхгофом метода спектрального анализа, явившегося мощным средством изучения небесных тел, мы отмечаем появление нового направления в астрономии – астрофизики (1859–1862 гг.). В основе метода лежит открытый и теоретически разработанный Кирхгофом фундаментальный закон электромагнитного излучения – для каждой определенной длины волны соотношение излучательной и поглощательной способности у всех тел одно и то же, и оно зависит только от температуры и длины волны. Вещество, способное излучать определенную спектральную линию, имеет также большую поглощательную способность в этой линии. Это явилось ключом к пониманию фраунгоферовых линий в спектре Солнца. Открытия Кирхгофа позволили по-новому подойти к проблеме физической природы Солнца. В 1859 году Кирхгофом в спектре Солнца были найдены и идентифицированы линии Na, Ca, Mg, Cr, Cu, Zn, Ba, Ni. Так впервые в истории были идентифицированы линии химических элементов в астрономических спектрах. И, конечно, достойной прелюдией к открытиям Кирхгофа являются работы и открытия Фраунгофера! Поэтому мы не можем не вспомнить, что самый первый решающий шаг в астроспектроскопии сделал Фраунгофер, который в 1814 г. впервые обнаружил наличие линий поглощения в солнечном спектре, названных впоследствии его именем (ему тогда было 27 лет!). А наблюдая спектры Луны, Марса, Венеры, он нашел их подобными солнечному спектру, что доказывало свечение этих тел отраженным солнечным светом. Он ввел в практику астрономических наблюдений объективную призму, что позволило наблюдать одновременно сотни спектров звезд, и впервые применил дифракционную решетку для изучения спектров.

В это же время Кирхгоф обнаружил и слабые признаки линии Li I 6708 Å в солнечном спектре. Однако эта линия была хорошо видна только в солнечных пятнах, и впервые это было замечено в 1907 г. Хейлом и Адамсом [6].

О ПРОБЛЕМЕ ЛИТИЯ

Два элемента – литий и бериллий – занимают среди всех элементов особое положение, потому что их содержание в звездных атмосферах может меняться уже на стадии ГП. Это объясняется тем, что разрушение лития и бериллия происходит в термоядерных реакциях, при довольно низких температурах: $T = 2.5 \cdot 10^6$ K для Li и $T = 3.5 \cdot 10^6$ K для Be. Поэтому, если в звезде существует перемешивание, захватывающее и наружные слои (конвекция), то оно может привести к тому, что литий, попадая из атмосферы в более глубокие слои, разрушается, и вещество, которое выносится в атмосферу, обеднено литием.

Следует отметить, что содержание лития определяется обычно по одной линии Li I 6708 Å (резонансный дублет), которую можно наблюдать только в спектрах достаточно холодных звезд. Нормальная звезда, имея заметное начальное содержание лития, в процессе эволюции вдоль главной последовательности, при изменении температурного режима и условий перемешивания, приходит к концу своего эволюционного пути, практически полностью исчерпав запасы лития.

Большая часть проэволюционировавших звезд (поздние гиганты) имеют дефицит лития. Однако среди некоторых проэволюционировавших звезд (красных гигантов) наблюдается большой разброс в содержании лития до 6 порядков, и этот разброс указывает на некоторые физические процессы:

1. те, которые тормозят перемешивание звездного вещества и разрушение лития;
2. если содержание лития велико, то создаются условия для процессов возникновения лития в этих объектах.

Вращение звезды и сильное магнитное поле влияют на эти процессы.

Что касается синтеза лития в красных гигантах, то в работе Ламберта и Сойера [9] высказывалось предположение о том, что богатые литием гиганты в своем эволюционном пути проходили стадию химически пекулярной звезды с магнитным полем, и предположение о синтезе лития в результате реакций скалывания (“spallation reaction”), которые идут на поверхности звезд с сильными магнитными полями, ускоряющими протоны и альфа-частицы. Предположения авторов о том, что Li-rich гиганты в своем развитии проходили стадию химически пекулярной звезды, стимулировало интерес к проблеме лития в магнитных CP-звездах.

Проблема лития в Ap-CP-звездах многие годы была предметом многочисленных дебатов по причине дефицита наблюдений и противоречивости результатов этих наблюдений. Обилие индивидуальных особенностей CP-звезд – высокое содержание тяжелых и особенно редкоземельных элементов (REE): Eu, Gd, Ce, Pr, Nd, магнитные поля, сложная структура распределения элементов по поверхности и пульсации у многих CP-звезд – осложняют поиски лития и определение его содержания.

На Международном совещании в Словакии в 1996 году была обсуждена ситуация с проблемой лития в Ap-CP-звездах. Результаты исследований лития, полученные в КрАО (Полосухина 1973–1976 гг. [1, 2]), а также работы Фараджианы и Хак [5], Валлерстейна и Хак [19], Фараджианы и др. [7] легли в основу Международного проекта “Литий в CP-звездах с магнитными полями”. Основная цель проекта состояла в том, чтобы используя систематические спектральные наблюдения Ap-CP-звезд в разных фазах вращения звезды в спектральной области резонансного дублета Li I 6708 Å и субординатной линии Li I 6103 Å, полученные на телескопах мира, попытаться создать базу данных, достаточную для понимания физических причин аномального содержания лития в атмосферах этих звезд. Систематические наблюдения по Международной программе “Литий в CP-звездах с магнитными полями” проводились с 1996 г., используя телескопы КраО (ЗТШ), ESO (CAT, FEROS). В настоящее время этот проект включен в программу наблюдений на БТА (6-м).

Уже первые наблюдения roAp-CP-звезд в рамках Международного проекта продемонстрировали аномально высокое содержание лития в ряде этих звезд и разное поведение дублета лития 6708 Å с фазой вращения. Наиболее важным результатом этих наблюдений явилось открытие переменности профиля линии Li I 6708 Å с фазой вращения у двух южных roAp-звезд, HD 83368 и HD 60435. Значительный переменный доплеровский сдвиг достигает 0.7 Å для HD 83368 и является результатом вращательной модуляции “запятненной” литием поверхности звезды.

Не менее важным было обнаружение синхронных изменений положения линии лития 6708 Å, напряженности магнитного поля $H_{\text{эф}}$, блеска звезды и феномена осцилляций, которые были объяснены моделью наклонного ротатора (Норт и др. [10], Полосухина и др. [13]) (рис. 1). Впервые было получено указание на связь между локальной структурой атмосферы в области образования линии лития 6708 Å и конфигурацией магнитного поля.

Открытие литиевых структур на поверхности холодных CP-звезд, связанных со структурами магнитного поля, привело к открытию литиевых зон (пятен) вблизи магнитных полюсов дипольного магнитного поля звезды (Шаврина и др. [16]).

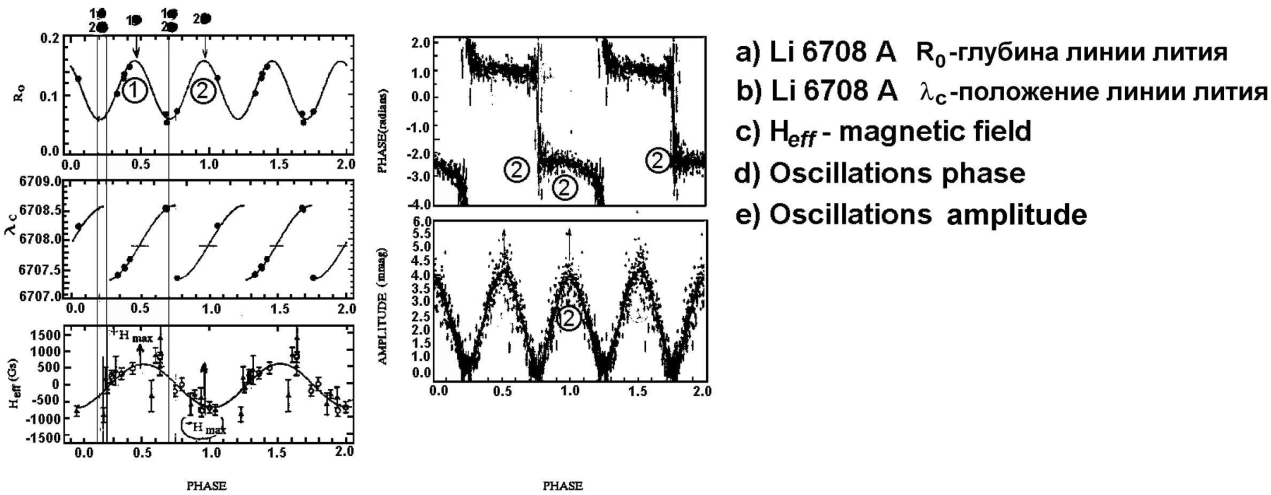


Рис. 1. Вариации физических параметров звезды HD 83368 с фазой вращения

ПРОГРАММА НАБЛЮДЕНИЙ

Программа наблюдений лития в CP-звездах, которая была поставлена на БТА, имела следующие цели:

1. Тестовые наблюдения – поиски линий лития Li I 6708 Å в спектрах отобранных CP-звезд.
2. Наблюдения медленно вращающихся roAp-звезд (с узкими линиями) ($v \sin i < 10$ км/с)
3. Мониторинг быстро вращающихся CP-звезд ($v \sin i > 10$ км/с) для изучение поведения линии лития 6708 Å с фазой вращения – поиски CP-звезд с “литиевыми” пятнами.
4. Идентификация слабых линий REE вблизи линии Li I 6708 Å в спектрах медленно вращающихся CP-звезд.
5. Определение содержания Li, используя линии Li I 6708 Å и Li I 6103 Å, с учетом магнитного поля.
6. Определение отношения изотопов ^{6}Li/^{7}Li, используя линию 6708 Å.

Эта долговременная программа предназначена для увеличения количества наблюдательных данных по литию и для построения базы данных CP-звезд в спектральных областях Li I 6708 Å и Li I 6103 Å с целью лучшего понимания аномального поведения этих линий в CP-звездах.

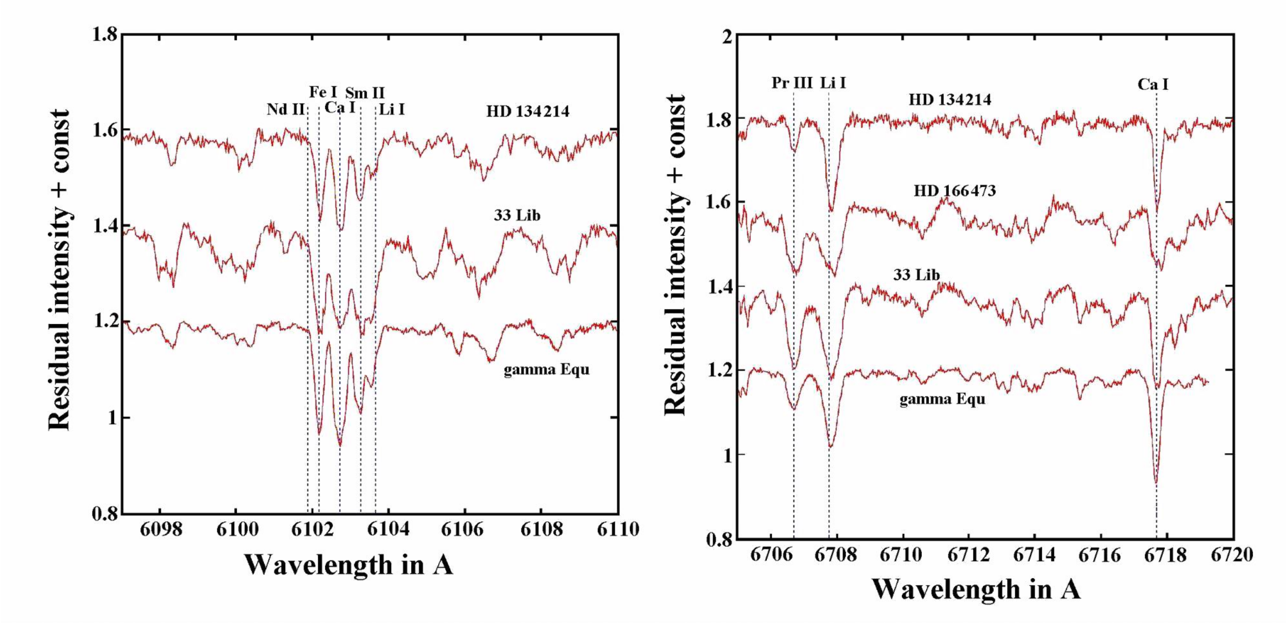
НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ (2003–2009)

Наблюдения были выполнены в фокусе Нэсмита 6-м телескопа с эшеле-спектрометром НЭС (В. Панчук, В. Клочкова [11]) в спектральной области 6000–6800 Å с отношением S/N 60–100.

Для обработки спектров был использован пакет программ “Reduce” (Пискунов, Валенти [12]).

1. Тестовые наблюдения позволили нам добавить несколько новых звезд с линией лития 6708 Å к старому списку: HD 62140, HD 65339, HD 176232, HD 107612, HD 149822, HD 169842. Некоторые из этих звезд короткопериодические, и мы планируем выполнить мониторинг этих звезд с фазой вращения для изучения поведения Li I-линии.
2. Звезды roAp (CP) с узкими линиями. Звезды 33 Lib, HD 134214, HD 166473 – звезды медленно вращающиеся ($v \sin i < 10$ км/с), очень богаты REE-линиями и имеют сильные поля (1500–5000 Гс). Новые наблюдения подтвердили полученные ранее результаты и не показали вращательной переменности сильной линии лития Li I 6708 Å. На рис. 2 приведены оригинальные спектры этих звезд, показавшие высокое содержание лития в атмосферах указанных звезд по обеим линиям лития Li I 6708 Å и Li I 6103 Å. Анализ выполнен методом синтетического спектра с учетом магнитного поля, причем более высокое содержание лития получено по линии 6103 Å. Количественный анализ атмосфер этих звезд и модельные расчеты выполнены в работе Шавриной и др. [17].

Для уточнения полученных результатов нужны новые наблюдения этих и других CP-звезд.



а б

Рис. 2. Оригинальные спектры анализируемых roAp-звезд с узкими линиями HD 134214, HD 166473, HD 137919 (33 Lib), HD 201001 (γ Equ) в двух областях вблизи линии лития 6103 Å (*а*) и 6708 Å (*б*)

МЕТОД ДИСПЕРСОГРАММ

Метод выделения переменных деталей в спектре (метод дисперсограмм) используется, чтобы представить переменность спектра более очевидной. Для этого мы рассчитываем так называемый “спектр переменности” как величину дисперсии значений интенсивности в каждой длине волны I_i от среднего значения интенсивности I_{mean}:

$$\sigma_{obs} = \frac{1}{I_{mean}} \sqrt{\frac{\sum (I_i - I_{mean})^2}{n-1}}, \qquad (1)$$

где I_i – значение интенсивности спектров звезды в отдельных длинах волн i, I_{mean} – среднее значение интенсивности в этих длинах волн, n – число наблюденных спектров.

Дисперсограммы были построены для тестовых звезд и остальных наблюденных звезд.

На рис. 3 мы показываем примеры дисперсограмм для медленно вращающихся звезд с постоянной линией лития Li I 6708 Å: HD 134214, HD 166473, 33 Lib.

Быстро вращающиеся Ap-CP-звезды ($v \sin i > 10$ км/с) – HD 65339, HD 169842, HD 12098. Среди этих звезд следует особо отметить HD 12098 ($m = 8.0$, FO), в спектре которой была обнаружена сильная и переменная линия лития 6708 Å, что привело к открытию у этой недавно обнаруженной на северной полусфере первой осциллирующей roAp-звезды “литиевых” пятен с аномально высоким содержанием лития (до 4.0 dex). Из рис. 4, 5 следует очевидность подобия переменности спектров HD 12098 и HD 60435 (классическая roAp-звезда с литиевыми пятнами). Количественный анализ и модельные расчеты для звезды HD 12098 выполнены в работах Шавриной и др. [4, 18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисперсограммы отчетливо продемонстрировали различное поведение линии лития в спектрах медленно вращающихся и быстро вращающихся roAp-звезд. Наблюдения CP-звезд на БТА подтвердили постоянство интенсивности линии лития Li I 6708 Å в спектрах медленно вращающихся звезд, найденное по наблюдениям в ESO (1996 г.). Анализ спектров и модельные расчеты наблюденных медленно вращающихся звезд HD 134214, 33 Lib, HD 166473 показали:

– Содержание лития, определенное по субординатной линии 6103 Å несколько выше, чем определенное по резонансной линии лития 6708 Å для всех указанных в этой группе звезд.

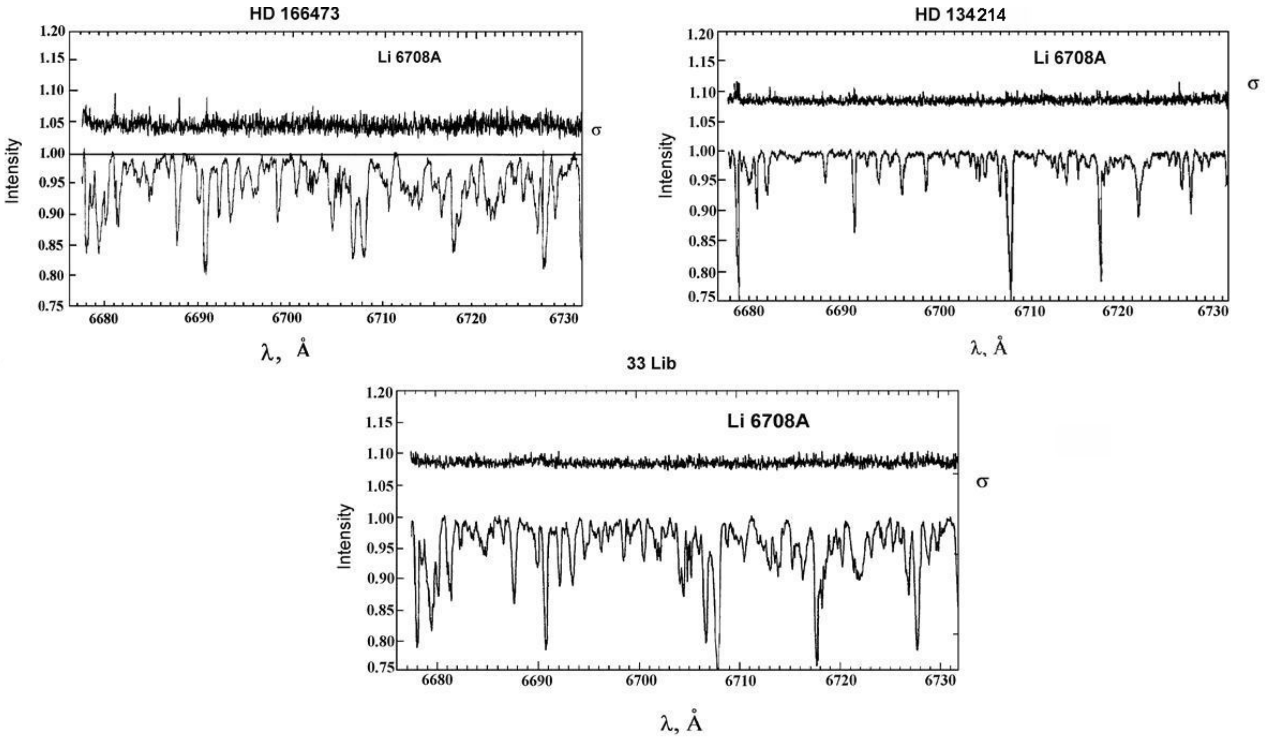


Рис. 3. Примеры дисперсограмм для медленно вращающихся звезд с постоянной линией Li I 6708 Å HD 134214, HD 166473, 33 Lib

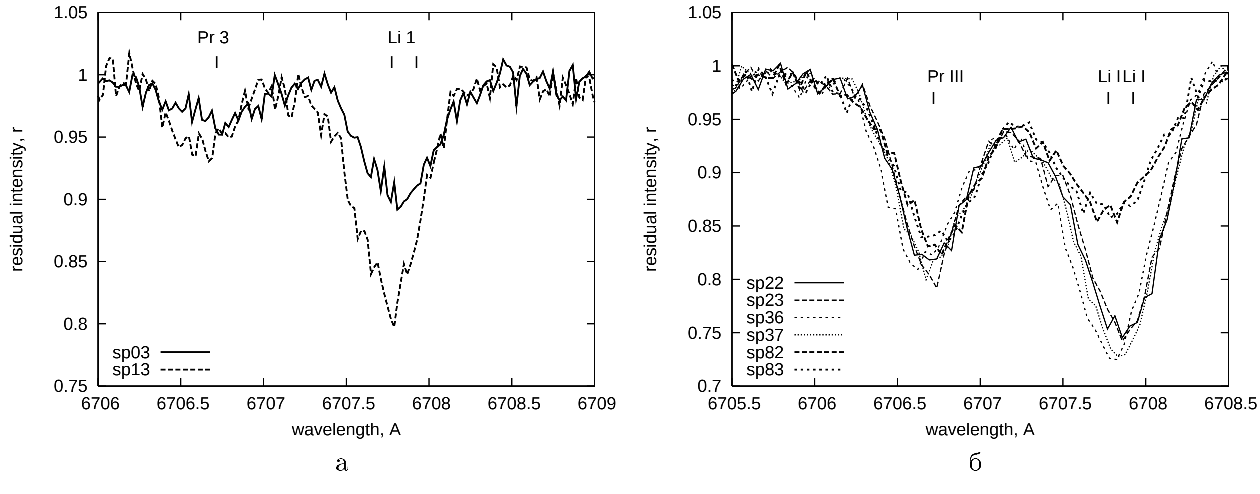


Рис. 4. Спектры HD 60435 (*а*) и HD 12098 (*б*) в области линии лития 6708 Å для фаз вращения вблизи 0.0 и 0.5

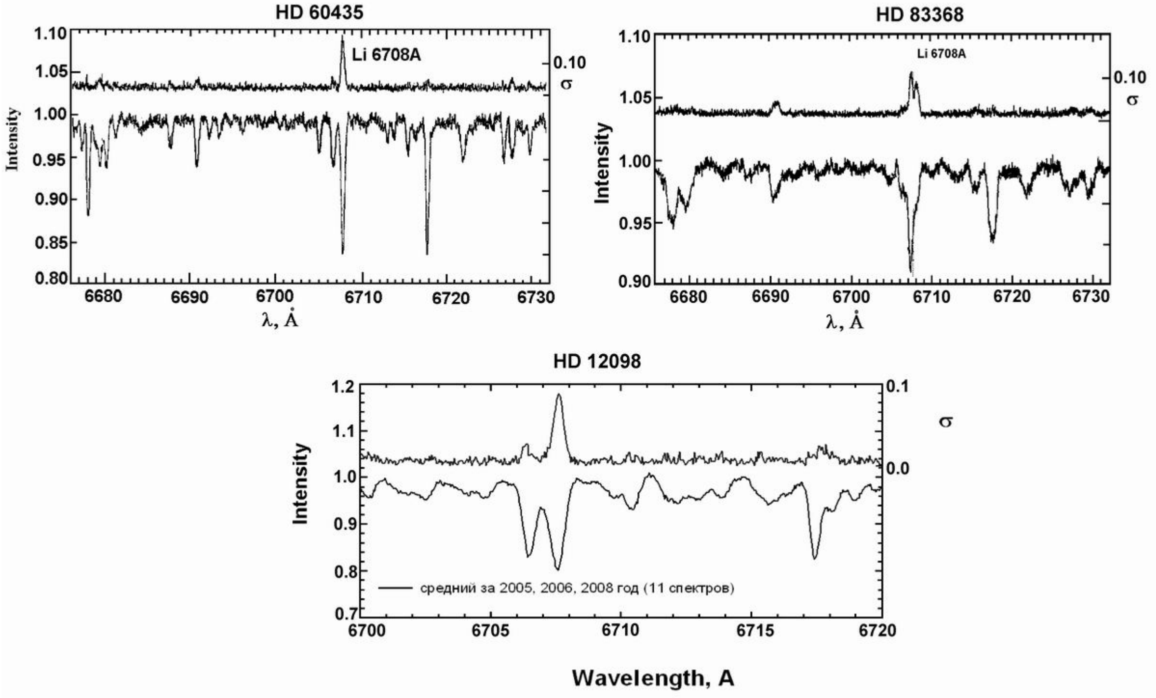


Рис. 5. Дисперсограммы для пятнистых CP-звезд HD 60435, HD 83368 и HD 12098

– Изотопный состав лития (^{6}Li/^{7}Li) слегка отличается от одной звезды к другой и превышает отношение ^{6}Li/^{7}Li для солнечной атмосферы. Содержание лития в этих звездах превышает космическое содержание лития.
– По наблюдениям на БТА спектров звезды HD 12098 в области Li I 6708 Å были обнаружены сильные изменения этой линии, свидетельствующие об открытии еще одной Ap-CP-звезды с литиевыми пятнами. Рис. 5 отчетливо показывает идентичность поведения спектров HD 12098 со звездой HD 60435 (классическая roAp-звезда с литиевыми пятнами).
– Дисперсограммы для HD 12098 и "запятненных литиевых звезд" HD 60435 и HD 83368 отчетливо демонстрируют подобную переменность спектра этих звезд, а также показывают, что амплитуда изменений интенсивности линии лития 6708 Å существенно больше амплитуды изменения интенсивности линий REE Nd III, Pr III, Ce II и др. Этот метод – дополнительное свидетельство принадлежности бленды 6708 Å линии Li I 6708 Å и свидетельство различия поверхностного распределения лития и REE в CP-звездах с магнитными полями.
– В завершение данного исследования приводим таблицы результатов определения содержания лития по спектрам БТА и CAT (ESO).

Таблица 1. Содержания лития в медленно вращающихся roAp-звездах

	HD 101065	HD 134214	HD 137949	HD 137949	HD 166473	HD 201601
$T_{эф}$/lg g/[M]	6600/4.2/0	7500/4.0/0	7750/4.5/0/	7250/4.5/0	7750/4.0/0	7750/4.0/0
ε (Li) 6708 Å	3.1	3.9	4.1	3.6	3.6	3.8
ε (Li) 6103 Å	3.5	4.1	4.4	4.4	4.0	4.0
^{6}Li/^{7}Li, 6708 Å	0.4:	0.3:	0.2:	0.3:	0.4:	0.5:

Таблица 2. Содержание лития в пятнах HD 12098

N	Долгота	Широта	R	ε (Li)
1	30°	–20°	40°	5.0
2	180°	25°	70°	4.2
3	290°	–25°	40°	4.4

– Повышенное содержание лития может быть обусловлено физическими процессами, препятствующими перемешиванию звездного вещества и сохранению в атмосфере его первоначального высокого содержания, подавлением конвекции магнитными полями в сочетании с амбиполярной диффузией. Другая возможность – это реальные процессы возникновения лития в звездных атмосферах, например в реакциях скалывания (spallation reactions) на поверхности, при которых ускоренные в магнитных полях протоны и альфа-частицы разрушают более тяжелые атомы C, N, O, и в результате продуцируется литий [8].

[1] *Полосухина Н. С.* Наблюдения линии Li I 6708 Å в спектрах нескольких магнитных переменных звезд // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1973. – **47**. – С. 118–124.

[2] *Полосухина Н. С.* О смещении линии Li I 6708 Å в спектрах магнитных звезд // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1974. – **50**. – С. 57–62.

[3] *Полосухина Н. С., Шаврина А. В.* Литий в химически пекулярных CP звездах с магнитными полями // Астрофизика. – 2007. – **50**, N 3. – С. 381–404.

[4] *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**, N 4. – С. 607–615.

[5] *Faraggiana R., Hack M.* Probable Excess of Lithium in the Atmosphere of the Magnetic Star β Coronae Borealis // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1963. – **75**, N 445. – P. 376–377.

[6] *Hale G. E., Adams W. S.* Second Paper on the Cause of the Characteristic Phenomena of Sun-Spot Spectra // Astrophys. J. – 1907.– **25**, N 1. – P. 75–94.

[7] *Gerbaldi M., Faraggiana R., Castelli F.* Li I 6708 in normal A and F-type stars // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1995. – **111**, N 1. – P. 1–15.

[8] *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.

[9] *Lambert D. L., Sawyer S. R.* Lithium in late-type giants. III. The weak G band giants // Astrophys. J. – 1984. – **283**, N 1. – P. 192–199.

[10] *North P., Polosukhina N., Malanushenko V., Hack M.* The AP star HD 83368 may be a lithium-spotted pulsator // Astron. and Astrophys. – 1998. – **333**, N 3. – P. 644–646.

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

[12] *Piskunov N., Valenti J.* New algorithms for reducing cross-dispersed echelle spectra // Astron. and Astrophys. – 2002. – **385**, N 4. – P. 1095–1106.

[13] *Polosukhina N. S., 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.

[14] *Ryabchikova T., Wade G., Auriere M., et al.* Rotational periods of four roAp stars // Astron. and Astrophys. – 2005. – **429**, N 1. – P. L55–L58.

[15] *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.

[16] *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.

[17] *Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Khan S., et al.* Lithium and the ^{6}Li/^{7}Li isotope ratio in the atmospheres of some sharp-lined roAp stars // Astron. Rep. – 2006. – **50**, N 6. – P. 500–511.

[18] *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.

[19] *Wallerstein G., Hack M.* Possible variations of the lithium line in beta Coronae Borealis // Observatory. – 1964. – **84**. – P. 160–161.