

УДК 524.33

## Литий в Ар-Ср звездах с магнитными полями

*Н.С. Полосухина*<sup>1</sup>, *А.В. Шаврина*<sup>2</sup>, *Н.А. Драйке*<sup>3,4</sup>, *М.А. Смирнова*<sup>1</sup>, *Д.О. Кудрявцев*<sup>5</sup>

<sup>1</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, АР Крым, Украина, 98409  
*polo@crao.crimea.ua*

<sup>2</sup> Главная астрономическая обсерватория НАН Украины  
*shavrina@tao.kiev.ua*

<sup>3</sup> Астрономический институт имени Соболева, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>4</sup> Observatório Nacional/MCT, Rio de Janeiro, Brazil  
*drake@on.br*

<sup>5</sup> Специальная астрономическая обсерватория РАН  
*dkudr@sao.ru*

Поступила в редакцию 21 декабря 2012 г.

**Аннотация.** Мы изучаем проблему содержания лития и отношения изотопов  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  в атмосферах некоторых магнитных roAp звезд. Наши расчеты синтетических спектров производились с учетом магнитного и других эффектов уширения линий. Высокое содержание лития было найдено в атмосферах некоторых Ар-звезд, основанное на анализе обеих линий лития Li I 6104 Å и Li I 6708 Å с высоким значением отношения изотопов  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  (0.2–0.5).

Это можно было объяснить синтезом лития в spallation реакциях на поверхности звезды вблизи магнитных полюсов.

LITHIUM IN Ar-Cr STARS WITH MAGNETIC FIELDS, *by N.S. Polosukhina, A.V. Shavrina, N.A. Drake, M.A. Smirnova, D.O. Kudryavtsev.* We discuss lithium abundance and  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  isotopic ratio in atmospheres of some magnetic roAp stars. Overabundances of the lithium were found in atmospheres of some roAp stars based on the analysis of both lithium lines at 6104 Å and 6708 Å as well as the high values of the  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  isotopic ratio (0.2–0.5).

These facts can be explained by lithium production in spallation reactions on stellar surface and by preserving  ${}^7\text{Li}$  and  ${}^6\text{Li}$  isotopes to be destroyed in the inner layers of stellar atmospheres by strong magnetic fields near magnetic poles. Our synthetic spectrum calculations take into account magnetic line broadening effects.

**Ключевые слова:** литий, спектральный анализ, магнитные Ар-Ср-звезды, магнитные поля

---

## 1 Литий в спектрах звезд различных спектральных типов

Самая сильная линия лития в спектрах звезд – это резонансный дублет Li I 6708 Å – очень чувствительна к эволюционным изменениям, температурному режиму и условиям перемешивания.

Обычно литий истощается с возрастом звезды, и присутствие в спектре звезды линии лития Li I 6708 Å есть указание либо на молодость звезды или на отсутствие перемешивания между внутренними (горячими) и поверхностными (холодными) слоями звезды ( $\chi = 5.4$  eV) или же высокое

содержание лития есть указание на активные процессы с возможным синтезом лития (Хербиг, 1964, 1965; Горизелли, 2007).

Магнитное поле является одним из условий синтеза лития на поверхности звезды. Воздействие поверхностной активности, связанной со структурой магнитного поля на профили линии лития 6708 Å – это одна из проблем, обсуждаемых для хромосферно-активных Li-rich гигантов позднего типа. Попытки обнаружить пятна лития и вращательную модуляцию с фотометрической переменностью показали противоречивые результаты (Палавичини и др., 1993).

Ламберт и Сойер (1984) предположили, что гиганты с повышенным содержанием Li могут быть потомками (“descendants”) одного или нескольких классов магнитно-пекулярных Ар-Ср звезд, т. е. имеется эволюционная связь между магнитными Ар-звездами с аномальным содержанием лития и Li-rich гигантами.

## 2 Литий в Ар-Ср звездах

Проблема лития в Ар-Ср звездах долгое время была спорной проблемой. Индивидуальные характеристики этих звезд: высокое содержание редкоземельных элементов (REE) и блендирование их линий в области дублета Li I 6708 Å, наличие сильных магнитных полей, расщепляющих как сам дублет линии лития, так и блендирующие линии, сложного поверхностного распределения химических элементов и их стратификации в атмосферах звезд, а также быстрые осцилляции CP2 звезд делают обнаружение линий лития и определение содержания лития сложным.

Быстровращающиеся осциллирующие Ар-звезды (гоАр) – есть некая подгруппа магнитных Ар-звезд (Куртц, 1982). Амплитуды и фазы осцилляций в гоАр-звездах меняются с вращением звезды. Эти изменения интерпретируются в рамках модели наклонного ротатора (Шибашаши и Таката, 1993). В различных работах показано, что линии REE Pr III и Nd III имеют большие амплитуды RV изменений в сравнении с линиями железной группы (имеющей значительно меньшие изменения). Работы Кочухова, Рябчиковой (2001), Кочухова и др. (2002), Рябчиковой и др. (2002) показали, что амплитуды осцилляций меняются, как функция глубины формирования линий.

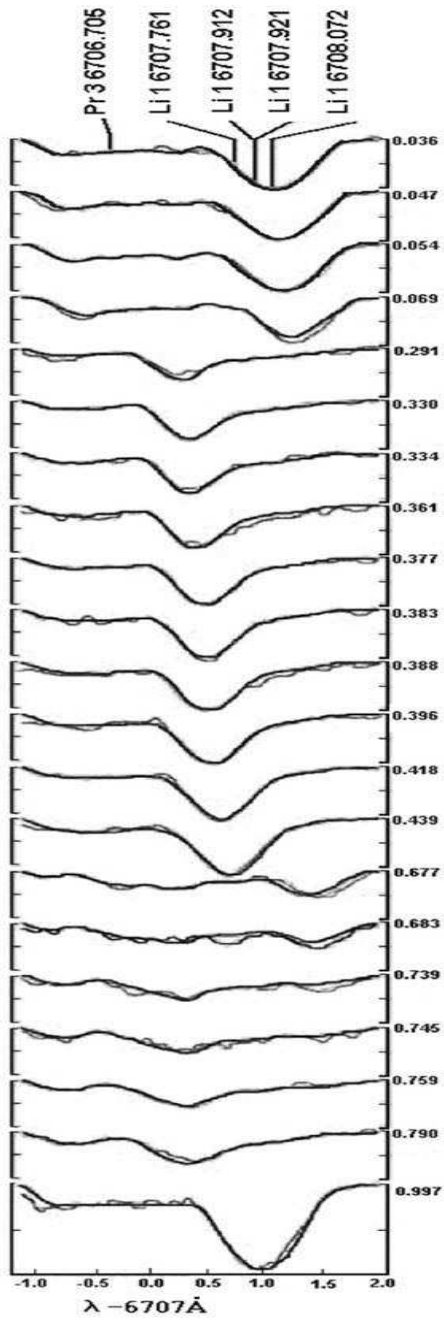
## 3 Быстровращающиеся Ар-Ср звезды ( $v \sin i > 10 \text{ km/s}^{-1}$ )

Наиболее важным результатом спектральных наблюдений гоАр-звезд было открытие переменности профиля линии лития Li I 6708 Å с фазой вращения в спектрах четырех гоАр-звезд “with lithium spots” (HD 83368, HD 60435, HD 12098 и HD 3980 (Полосухина и др., 1999, 2003; Шаврина и др., 2001, 2008; Кочухов и др., 2004; Драке и др., 2004). Доплеровский сдвиг линии Li I 6708 Å в спектрах HD 83368 ( $v \sin i = 27.6 \pm 2.1 \text{ kms}^{-1}$ ), HD 60435 ( $v \sin i = 11.0 \pm 2.0 \text{ kms}^{-1}$ ), HD 12098 ( $v \sin i = 13.0 \pm 2.0 \text{ kms}^{-1}$ ) и HD 3980 ( $v \sin i = 22.5 \pm 2.0 \text{ kms}^{-1}$ ) – результат модуляции вращением запятненной звездной поверхности. Мы показали, что литиевые пятна расположены близко к магнитным полюсам звездного магнитного поля.

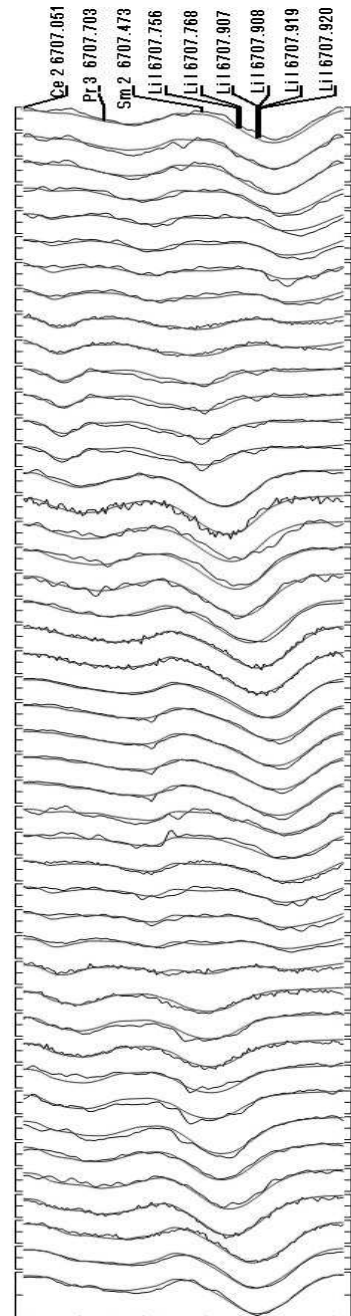
Очень важно было также открытие синхронных изменений положения линии Li I 6708 Å, магнитного поля  $H_{eff}$ , видимой звездной величины звезды и осцилляций. Корреляция между поведением литиевой бленды и переменностью магнитного поля звезды указывает на связь между конфигурацией магнитного поля и локальной структурой атмосферы звезды в области образования линии лития.

### 3.1 Доплеровское картирование для HD 83368 и HD 3980

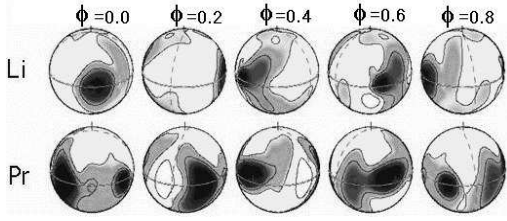
Доплеровское картирование было выполнено для звезд HD 83368 и HD 3980, используя программу Doppler Imaging code INVERS 12 (Н. Пискунов). Для HD 83368 программу применили Кочухов и др. (2004), используя спектры для 21 фазы вращения звезды (наблюдения FEROS на 1.52 м телескопе ESO and CAT/CES на 3.6 м телескопе ESO) (рис. 1).



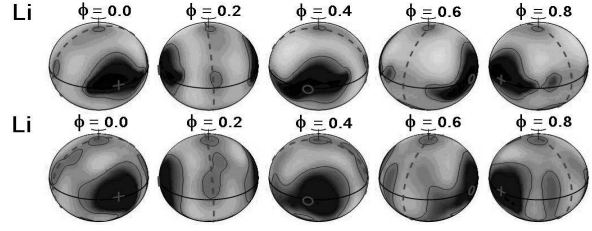
**Рис. 1.** Наблюдаемые и расчетные профили бленды 6708 Å с резонансным дублетом Li I 6708 Å с фазой вращения звезды HD 83368. (Рис. из работы Кочухов и др., 2004)



**Рис. 2.** Наблюдаемые и расчетные профили бленды 6708 Å с резонансным дублетом Li I 6708 Å с фазой вращения звезды HD 3980. (Рис. из работы Несвасил и др., 2012)



**Рис. 3.** HD 83368. Доплеровские карты для линий Li I 6708 Å и линий Pr 6706.706 Å (Кочухов и др., 2004)



**Рис. 4.** HD 3980. Доплеровские карты линий Li 6708 Å (Несвасил и др., 2012)

**HD 83368.**  $T_{\text{eff}} = 7650 \pm 150$  K,  $\log g = 4.20 \pm 0.20$ ,  $v \sin i = 27.6 \pm 2.1$  km s $^{-1}$ ,  $P_{\text{rot}} = 2.8520^d \pm 0.0005$ ,  $i \cong 68^\circ$ ,  $\beta = 87^\circ$ ,  $\log \varepsilon(\text{Li}) \cong 3.6$  dex,  $B_p = 2.5$  kG (Кочухов и др., 2004).

**HD 3980.**  $T_{\text{eff}} = 8300 \pm 250$  K,  $\log g = 4.0 \pm 0.20$ ,  $v \sin i = 22.5 \pm 2$  km s $^{-1}$ ,  $P_{\text{rot}} = 3.9516^d \pm 0.0003$ ,  $i \cong 60^\circ$ ,  $\beta = 88^\circ$ ,  $\log \varepsilon(\text{Li}) \cong 5.00$  dex,  $B_p = 6.9$  kG (Несвасил и др., 2012).

Результаты Доплеровского картирования подтвердили результаты, полученные Полосухиной и др. (2000), Шавриной и др. (2001). Эти результаты показали, что Li четко концентрируется в областях магнитных полюсов и имеет высокое содержание для HD 83368  $\log \varepsilon(\text{Li}) \cong 3.6$  dex (рис. 3).

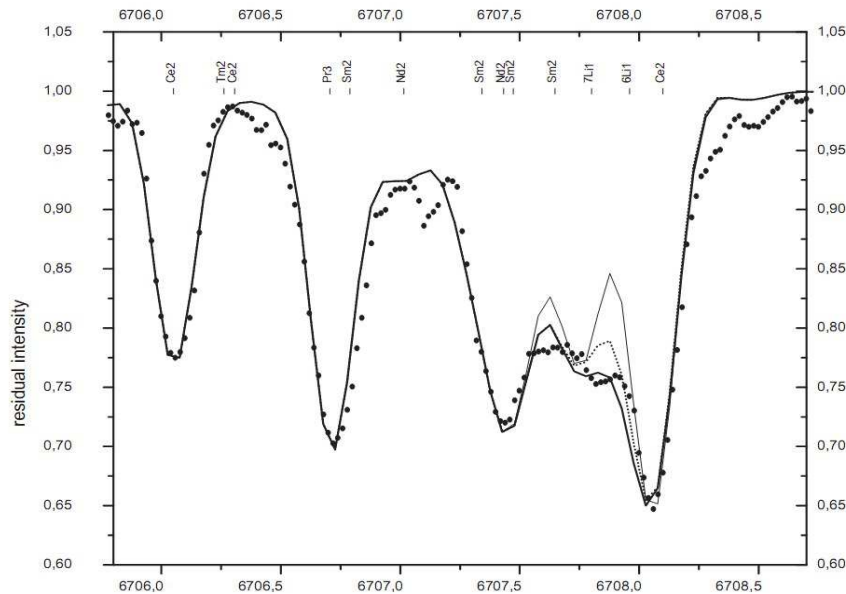
Несвасил и др. (2012) используя наблюдения 46 фаз вращения HD 3980 показали вариации обилия лития на поверхности HD 3980 (рис. 2). Было показано, что литий также изобилует в областях магнитных полюсов и достигает  $\log \varepsilon(\text{Li}) \cong 5.00$  dex (рис. 4).

#### 4 Медленно вращающиеся roAr-Cr звезды ( $v \sin i < 10$ km/s $^{-1}$ )

Звезды HD 101065, HD 134214, HD 137949, HD 166473 и HD 201601 являются низкоскоростными ротаторами ( $v \sin i < 10$  km/s $^{-1}$ ). Это звезды с сильными магнитными полями (1500–5000 G), которые имеют спектры, богатые REE линиями. Спектры этих звезд подтверждают результаты, полученные ранее: они не показывают никакой вращательной переменности сильной линии Li I 6708 Å. Содержание лития и отношение  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  для этих звезд были оценены в работе Шаврина и др. (2006). Результаты представлены в таблице 1. Мы можем предположить корреляцию между величиной магнитного поля  $B_s$  и изотопным отношением  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ .

**Таблица 1.** Содержание лития и его изотопное отношение  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  в 5 медленно вращающихся звездах

	HD 101065	HD 134214	HD 137949	HD 137949	HD 166473	HD 201601
$T_{\text{eff}}/\log g$	6600/4.2	7500/4.0	7750/4.5	7250/4.5	7750/4.0	7750/4.0
N(Li)6708 Å	3.1	3.9	4.1	3.6	3.6	3.8
N(Li)6104 Å	3.5	4.1	4.4	4.4	4.0	4.0
${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ 6708 Å	0.4 :	0.3 :	0.2 :	0.3 :	0.4 :	0.5 :
Bs(PrIII)kG	2.3	3.0	5.4	5.2	6.8	4.4
Bs(LiI 6708 Å)					9.8	
$v \sin i$ (km/sec $^{-1}$ ), Fe II	—	3.0	2.5	2.5	3.0	0.5
$v \sin i$ (km/sec $^{-1}$ ), Pr III	3.5	2.0	4.0	4.0	5.0	2.5



**Рис. 5.** HD 101065. Сравнение наблюдаемого и расчетного спектра вблизи 6708 Å: точки – наблюдаемый спектр, пунктирная линия – расчетный спектр для изотопа  ${}^7\text{Li}$ , толстая линия – с учетом  ${}^6\text{Li}$  ( ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3$ ). Тонкая линия соответствует спектру без учета лития, но с линией  $\text{Sm II}$  6707.799 Å. Положения тех линий, которые вносят основной вклад в поглощение, отмечены в верхней части рисунка

## 5 HD 101065 – пример наиболее пекулярной $\alpha\text{Ar}$ -звезды

Наличие лития в спектре этой уникальной звезды впервые упоминается в работе Пшибыльского (1961), и это интересное замечание было отмечено Варнером (1966), который сделал дополнительное наблюдение этой звезды в обсерватории Radcliffe, используя 74" рефлектор в спектральном диапазоне 3770–6880 ( $6 \text{ \AA}/\text{mm}$ ). Он обнаружил сильные линии однажды ионизированных REE в диапазоне (5500–6880). Как было упомянуто Пшибыльским (1966), линия  $\text{Sm II}$  (6707.45) может быть рассмотрена как часть литиевой бленды, но главный компонент этой бленды сохраняется за резонансным дублетом лития  $\text{Li I}$  6708 Å.

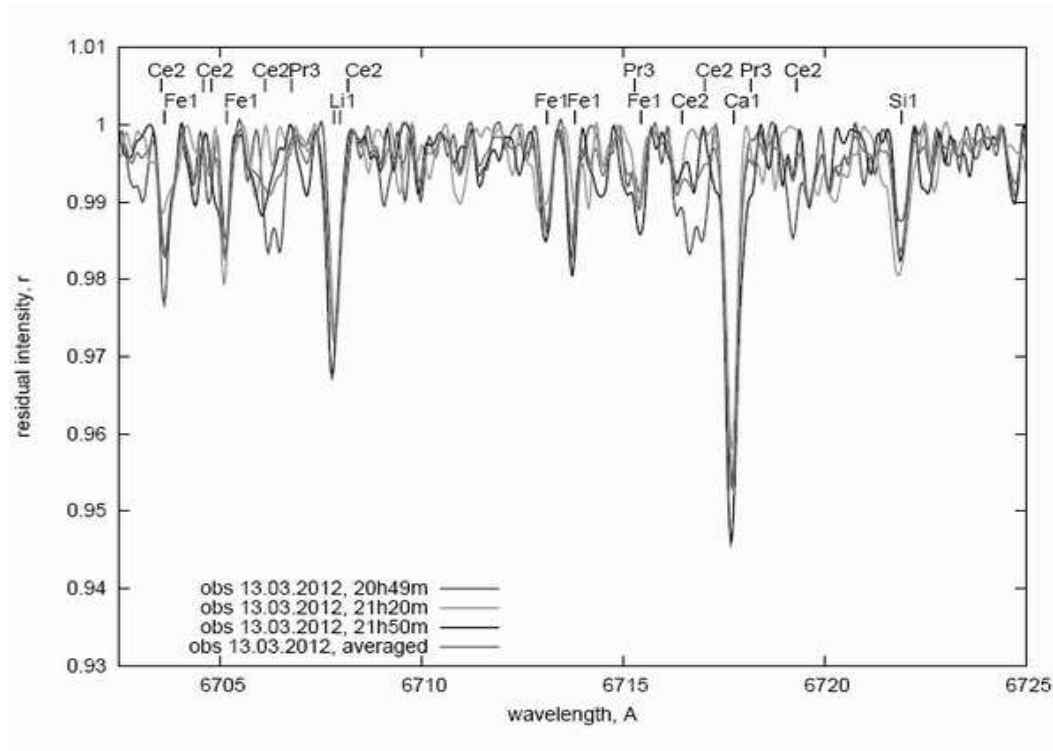
Первая оценка содержания лития относительно солнечного значения была сделана Варнером (1966):  $[\text{Li}/\text{H}] = 2.4 \text{ dex}$ . Этот автор упоминал о вероятном присутствии  ${}^6\text{Li}$ . Нортон и др. (1998) и Ниссенон и др. (2001) на телескопе CAT (ESO) были выполнены наблюдения этой звезды. Используя эти спектры и атомные данные для REE из баз данных для атомных линий VALD и DREAM (Шаврина и др., 2003) выполнили детальные расчеты бленды (6707.75–6708.75 Å).

Наличие лития в спектре HD 101065 очевидно (рис. 5) из сравнения наблюдаемого и синтетического спектра, который включает линии лития и редкоземельных элементов.

## 6 HD 50635 (молодая F0 звезда – Триллинг и др., 2007)

Наибольший интерес представляет звезда HD 50635 (рис. 6). Мы вычислили синтетические спектры HD 50635 (F0) с моделью атмосферы Куруца 7250/4.0 (параметры были взяты из Триллинг и др., 2007), где  $v \sin i = 8 \text{ km/s}^{-1}$ , и  $V_{\text{macro}} = 3 \text{ km/s}^{-1}$ . Мы определили содержание лития  $\lg N(\text{Li}) = 2.60$  (в шкале  $\lg N(\text{H}) = 12$ ).

Для нее обнаружен сдвиг линии лития  $\text{Li}$  6708 Å в длинноволновую часть спектра, который может свидетельствовать о повышенном содержании изотопа  $\text{Li}^6$ .



**Рис. 6.** На рисунке представлены полученные за 13.03.2012 три спектра HD 50635. Линии Fe I сохраняют свое положение по длине волны, тогда как другие линии, переменные по интенсивности и длине волны, вероятно, принадлежат REE линиям (CeII, PrIII) и сильной линии лития Li 6708 Å со смещением в длинноволновую часть спектра

Мы продолжаем интенсивные наблюдения HD 50635 на ЗТШ (КраО) для более подробного исследования этого объекта и поведения линии лития в спектрах звезды, имеющей очень сложную природу.

Для более качественного вычисления модели и количественного анализа спектров звезды нам нужно большее количество спектральных наблюдений с точной идентификацией линий REE и со спектральным разрешением более, чем 100000.

## 7 Заключение

Предполагаются два главных объяснения химических аномалий в атмосферах Ар-звезд: нуклеосинтез на поверхности звезд (вблизи магнитных полюсов) и гравитационная амбиполярная диффузия (Бабель, Мишо, 1991).

Вертикальное магнитное поле усиливает диффузию атомов и ионов, и она в значительной мере усиливается на магнитных полюсах. Это также объясняет увеличение обилия некоторых элементов в полярных областях. Амбиполярная диффузия с наибольшим эффектом будет влиять на легкие элементы и, особенно, на литий.

Наиболее важным результатом международной кооперации было открытие переменности профиля линии Li I 6708 Å с фазой вращения в 4 гоАр-звездах: HD 83368, HD 60435, HD 12098 и HD 3980.

Доплеровский сдвиг линии Li I в спектрах HD 83368 ( $v \sin i = 27.6 \pm 2.1 \text{ km/s}^{-1}$ ), HD 60435 ( $v \sin i = 11.0 \pm 2.0 \text{ km/s}^{-1}$ ), HD 12098 ( $v \sin i = 13.0 \pm 2.0 \text{ km/s}^{-1}$ ), а для HD 3980 ( $v \sin i = 22.5 \pm 2 \text{ km/s}^{-1}$ ) – результат вращательной модуляции запятненной литием поверхности звезды.

Было показано также, что пятна Li расположены вблизи магнитных полюсов дипольного магнитного поля (Полосухина и др., 1999, 2000; Шаврина и др., 2001, 2008; Кочухов и др., 2004; Д्राке и др., 2004; Несвасил и др., 2012). Высокое содержание лития можно было объяснить некоторыми физическими процессами, которые препятствуют перемешиванию в звездных атмосферах и поддерживают их высокое начальное содержание вследствие подавления конвективных движений сильными магнитными полями и действием амбиполярной диффузии.

Место, где ядерный синтез возможен на звездной поверхности – это вблизи полярных областей магнитного поля. Высокое содержание лития могло быть продуцировано в CP2-звездах с сильными магнитными полями в результате реакций скалывания (spallation reactions) в областях магнитных полюсов, где ускоренные протоны и  $\alpha$ -частицы разрушают ядра CNO и приводят к большому разбросу в содержании Li и его изотопов, поставив массу интересных вопросов для теоретических исследований диффузных механизмов и реакций скалывания в присутствии магнитных полей.

## Литература

- Бабель, Мишо (Babel J., Michaud G.) // *Astron. Astrophys.* 1991. V. 248. P. 155.  
 Варнер (Warner B.) // *Nature.* 1966. V. 211. P. 55.  
 Гориэлли (Goriely S.) // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 466. P. 619.  
 Д्राке и др. (Drake N.A., Polosukhina N.S., de la Reza R., Hack M.) // *Proc. IAU Symp.* 2004. V. 224. P. 692.  
 Кочухов, Рябчикова (Kochukhov O., Ryabchikova T.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 377. P. 22.  
 Кочухов и др. (Kochukhov O., Landstreet J.D., Ryabchikova T., Weiss W.W., Kupka F., et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2002. V. 337. P. 1.  
 Кочухов и др. (Kochukhov O., Drake N.A., Piskunov N., de la Reza R.) // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 424. P. 935.  
 Куртц (Kurtz D.W.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1982. V. 200. P. 807.  
 Ламберт, Соьер (Lambert D.L., Sawyer S.R.) // *Astrophys. J.* 1984. V. 283. P. 192.  
 Норт и др. (North P., Polosukhina N., Malanushenko V., Hack M.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 333. P. 644.  
 Ниссен и др. (Nissen P.E., Chen Y.Q., Benoni T., Zhao G.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 371. P. 943.  
 Несвасил и др. (Nesvacil N., Duftinger T., Shulyak D., Obbrugger M., Weiss W., Drake N., Hubrig S., Ryabchikova T., Kochukhov O., Piskunov N., Polosukhina N.) // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 537. P. 151.  
 Палавичини и др. (Pallavicini R., Cutispoto G., Randich S., Gratton R.) // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 267. P. 145.  
 Полосухина и др. (Polosukhina N., Kurtz D., Hack M., North P., Ilyin I., Zverko J., Shakhovskoy D.) // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 351. P. 283.  
 Полосухина и др. (Polosukhina N.S., Shavrina A.V., Hack M., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 357. P. 920.  
 Полосухина и др. (Polosukhina N.S., Drake N.A., Hack M., de La Reza R., Wood P.R., Shavrina A.V.) // *Proc. IAU Symp.* 2003. V. 210. D27.  
 Пшибыльский (Przybylski A.) // *Nature.* 1961. V. 189. P. 739.  
 Пшибыльский (Przybylski A.) // *Nature.* 1966. V. 210. P. 20.  
 Рябчикова и др. (Ryabchikova T., Piskunov N., Kochukhov O., Tsymbal V., Mittermayer P., Weiss W.W.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 384. P. 545.  
 Триллинг и др. (Trilling D.E., Stansberry J.A., Stapelfeldt K.R., Rieke G.H., Su K.Y.L., et al.) // *Astrophys. J.* 2007. V. 658. P. 1289.  
 Хербиг (Herbig G.H.) // *Astrophys. J.* 1964. V. 140. P. 702.  
 Хербиг (Herbig G.H.) // *Astrophys. J.* 1965. V. 141. P. 588.

- Шаврина и др. (Shavrina A.V., Polosukhina N.S., Zverko J., Mashonkina L.I., Khalack V., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 372. P. 571.
- Шаврина и др. (Shavrina A.V., Polosukhina N.S., Pavlenko Ya.V., Yushchenko A.V., Quinet P., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 409. P. 707.
- Шаврина и др. (Shavrina A.V., Polosukhina N.S., Khan S., Pavlenko Ya.V., Kudryavtsev D.O., et al.) // *Astron. Rep.* 2006. V. 50. P. 500.
- Шаврина и др. (Shavrina A.V., Glagolevskij Yu.V., Drake N.A., Polosukhina N.S., et al.) // *Odessa Astron. Publ.* 2008. V. 22. P. 111.
- Шибашаши, Таката (Shibahashi H., Takata M.) // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1993. V. 45. P. 617.