

УДК 523.985

## Определение содержания лития в солнечном пятне, наблюдения 1973 года

Э.А. Барановский, С.А. Мусорина, В.П. Таращук

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный  
*edward@crao.crimea.ua, batshumaher@crao.crimea.ua, vera@crao.crimea.ua*

Поступила в редакцию 25 ноября 2011 г.

**Аннотация.** Исследовался спектр солнечного пятна в области линии лития 6708 Å и некоторых линий CaI, AlI, FeI, YI, ScI, VI. Наблюдения проводились 8 июля 1973 г. на телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории. Была рассчитана модель пятна по наблюдаемым профилям линий CaI, AlI, FeI, YI, ScI, VI. С помощью рассчитанной модели пятна и наблюдаемого профиля линии Li 6708 Å определена величина содержания лития. Получено  $lg(N_{Li}) = 0.95$ .

THE LITHIUM ABUNDANCE IN THE SUNSPOT, OBSERVATIONS OF 1973, by E. A. Baranovsky, S. A. Musorina, V. P. Taraschuk. The sunspot spectrum in the region of the lithium line 6708 Å and some CaI, AlI, FeI, YI, ScI, VI lines have been investigated. Observations were carried out on July 8, 1973 with the telescope TST-2 of the Crimean Astrophysical Observatory. The spot model was calculated using the observed profiles of CaI, AlI, FeI, YI, ScI, VI lines. The lithium abundance was obtained using the calculated spot model and observed Li 6708 Å line profiles. The result is  $lg(N_{Li}) = 0.95$ .

**Ключевые слова:** Солнце, спектры, модель, литий

---

## 1 Введение

Известно, что для решения многих проблем современной астрофизики очень важно исследование поведения лития. Он наблюдается в звездах, в межзвездной среде, на Солнце, входит в состав многих тел солнечной системы. Существование его спустя 11 млрд лет после Большого взрыва таит еще много загадок. Современное содержание Li в межзвездной среде примерно в 10 раз больше, чем было в период формирования Галактики, когда химический состав среды отражал результат космического нуклеосинтеза. Однако наблюдения звезд разных типов и их моделирование позволили выяснить многие особенности его поведения, обнаружить существование литиевых пятен на некоторых звездах и др.

Предполагается, что литий может возникать в процессе мощных проявлений звездной активности. Однако уже при температуре около  $2.4 \cdot 10^6$  К происходит его выгорание. Наиболее принятой концепцией образования лития в настоящее время является столкновение тяжелых атомов с высокоскоростными частицами космических лучей. Так как количество лития очень мало, то его очень слабые спектральные линии представляют значительные трудности для наблюдений.

## 2 Литий на Солнце

Указанные трудности относятся не только к звездным наблюдениям, но и к наблюдениям Солнца. В отличие от некоторых звезд в атмосфере Солнца лития в 100 раз меньше, чем в межзвездной среде. Линии лития практически не наблюдаются в невозмущенной фотосфере, но значительно усиливаются в солнечных пятнах вследствие более низкой температуры (3500–4500° К). Поэтому наблюдения спектров солнечных пятен, четко видимых на солнечной поверхности, дает преимущество по сравнению со звездными спектрами для изучения лития. Пространственное разрешение деталей позволяет выяснить связь свечения лития со структурными образованиями.

У щелочного металла лития при переходе внешнего *s*-электрона на более высокие уровни возникают спектры с хорошо выраженными спектральными сериями, как у К, Na, Cs. И хотя переход 2*s*–2*p* является резонансным, и соответствующая спектральная линия должна быть максимальной по интенсивности, на Солнце остаточная интенсивность лития составляет всего 0.97. Спин электрона обуславливает тонкую структуру уровней, так что у Li образуются линии 6707.76 Å и 6707.91 Å (аналогично у Na 5895.92 Å и 5889.95 Å). При этом количество <sup>6</sup>Li составляет 7.5 % (он стабилен при наличии 3 нейтронов), а <sup>7</sup>Li – 92.5 % (стабилен с 4 нейтронами).

Изучение лития на Солнце, делящееся уже около полувека, до сих пор не дает ответа на многие проблемы его образования и эволюции. В первоочередные задачи изучения лития на Солнце входит: 1. Поведение излучения лития в различных структурных образованиях. 2. Необходимо выяснить, меняется ли его содержание в пятнах, имеющих различные физические характеристики. 3. Выяснение изменения содержания лития со временем, т. е. имеется ли влияние изменения солнечной активности на процесс возникновения лития на Солнце.

За последние 45 лет имеется только 6 работ, где приведено содержание Li, полученное по спектрам пятен в области линии 6708 Å: (Шмаль, Шрётер, 1965; Вьер и др., 1968; Трауб, Рослер, 1971; Энгвольд и др., 1970; Ритценхоф и др., 1997; Барановский, Таращук, 2008). Все определения сделаны в приближении ЛТР.

## 3 Наблюдения

В НИИ “КрАО” в последние несколько лет начаты исследования лития. Используются наблюдения с регистрацией на ПЗС-камеру на телескопе БСТ-2 (Барановский, Таращук, 2008). Но на протяжении многих лет на БСТ-2 велись фотографические наблюдения эшельных спектров. Просмотр архивных материалов позволил обнаружить в ряде случаев присутствие линии лития 6708 Å в спектрах пятен.

В данной работе исследовался эшельный спектр, полученный на БСТ-2 8 июля 1973 г. на пластинке Kodak для пятна с размером тени около 25". Координаты пятна W34, S13.

Особенностью наших исследований является то, что мы рассчитываем модель пятна для конкретно взятого наблюдения. Из имеющихся работ, посвященных определению лития, только в работах Ритценхофа и др. (1997), Барановского и Таращук (2008) был такой же подход. Во всех других случаях использовалась стандартная модель пятна. Это обстоятельство может являться дополнительным источником ошибок или давать недостоверный результат, если физические параметры пятен различались. Поэтому помимо фотометрии участка спектра с литием Li 6708 Å выбраны линии Ca 6717 Å, Al 6696 Å, Al 6698 Å, Fe 6710 Å, Y 6687 Å, Sc 6210 Å, V 6216 Å. Именно их профили (линии Ca, Al, Y, Fe, Sc, V) использовались для построения модели пятна.

## 4 Вычисления

Модель пятна определялась методом подбора параметров – температуры, плотности, турбулентной скорости и магнитного поля как функций глубины в фотосфере. Критерием пригодности модели являлась степень согласия вычисленных и наблюдаемых профилей упомянутых выше линий.

Магнитное поле определялось по ширине профилей магниточувствительных линий (напр., линии CaI 6717). При согласовании вычисленных и наблюдаемых профилей подбирается величина

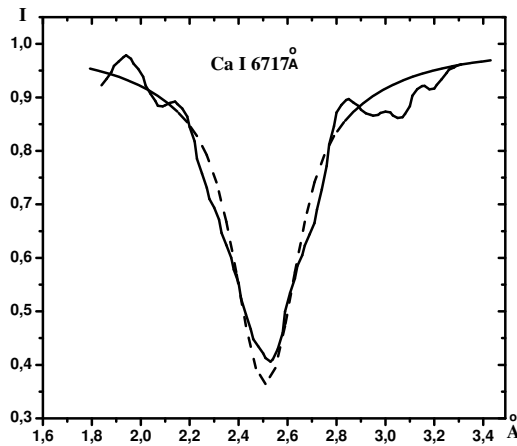
турбулентной скорости и магнитного поля. Турбулентная скорость при этом определяется по линиям, мало чувствительным к магнитному полю (напр., линия ScI 6210).

При расчете модели величина рассеянного света задавалась как свободный неизвестный параметр, который определяется путем подбора – так же, как и параметры модели. Определенная таким способом величина рассеянного света равна 25 %. Имеется в виду рассеянный свет в пятне – это свет от соседних с пятном участков невозмущенной фотосферы и полутени, который накладывается на излучение пятна вследствие дрожания изображения или размытости из-за плохого изображения.

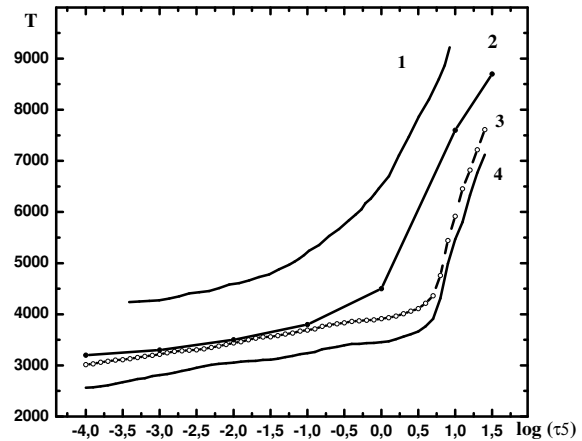
Вычисления профилей делались по нашей ЛТР-программе (Барановский, 1993) и по ЛТР-программе SIR (Руиз Кобо, дель Торо Иньеста, 1992). Профили линии 6708 Å рассчитывались как бленда, состоящая из 9 компонент. Все компоненты являются переходами между разными подуровнями  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^6\text{Li}$ . Для расчетов было взято отношение содержания  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.03$ .

Программу SIR мы применяем только в варианте прямого счета профиля: задана модель и для нее рассчитывается профиль линии. Коррекция модели программой не делается.

На рис. 1 изображен пример согласования профилей линии Ca I 6717 Å при расчете модели.



**Рис. 1.** Согласование вычисленных (пунктир) и наблюдаемых (сплошная) профилей при расчете модели пятна

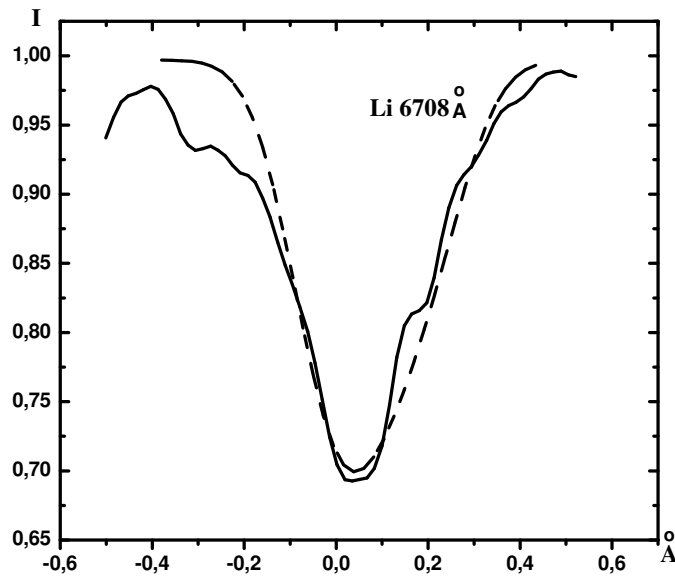


**Рис. 2.** Температура: 1 – в невозмущенной фотосфере; в моделях пятен: 2 – Ритценхоф, 1997. 3 – Барановский и Таращук, 2008. 4 – настоящее исследование

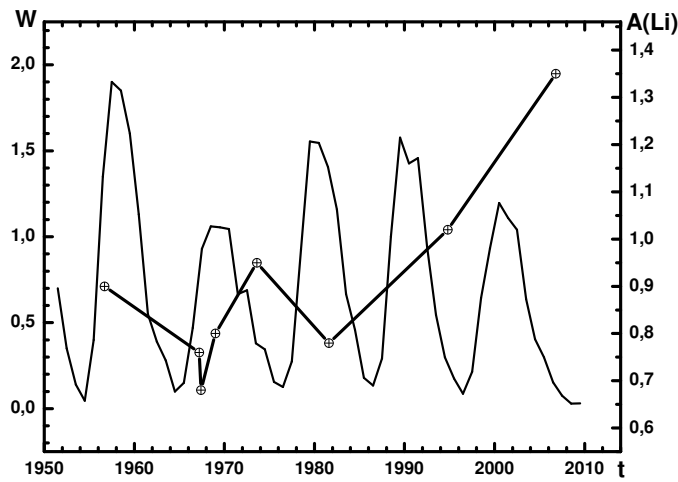
Для сравнения нашей модели пятна и полученных ранее моделей (Ритценхоф, 1997; Барановский и Таращук, 2008) приводится рис. 2, где показан ход температуры с оптической глубиной в разных моделях. Плотность в нашей модели оказалась близкой к плотности в модели невозмущенной фотосферы.

С окончательным вариантом модели пятна, полученной по согласованию всех профилей измеренных линий, рассчитывались профили линии лития Li 6708 Å для разных значений содержания лития и выбиралась величина содержания, с которой вычисленный профиль согласуется с наблюдаемым.

Согласование вычисленных и наблюдаемых профилей линии лития 6708 Å показано на рис. 3. Вычисленный профиль на рис. 3 соответствует содержанию лития  $A(\text{Li}) = 0.95$ .



**Рис. 3.** Согласование вычисленных (пунктир) и наблюдаемых (сплошная) профилей линии лития 6708 Å при определении величины содержания лития



**Рис. 4.** Результаты определения содержания лития в разные годы (звездочки) и числа Вольфа (кривая без значков)

## 5 Обсуждение и выводы

Таким образом, полученная нами величина содержания составляет для 1973 года  $A(\text{Li}) = 0.95$ .

Результаты по данным спектров за 1981 и 2006 годы, полученные нами ранее, соответственно

показали  $A(\text{Li})$  0.78 и 1.35. На рис. 4 нанесены величины содержания лития в пятнах, определенные в разные годы. Полученная в данном исследовании величина (1973 г.) больше результатов за ближайšie годы, но меньше значений двух последних определений (1994 и 2006 годы). В предыдущей нашей работе мы отметили две тенденции, которые сохраняются и в настоящем исследовании:

- 1) рост полученных величин содержания со временем и
- 2) наибольшие величины содержания получены во время минимумов активности.

Величины содержания лития, представленные на рис. 4, можно исправить за не-ЛТР эффекты, используя результаты расчетов Карлссона и др. (1994). Из этих расчетов следует, что для атмосферы с параметрами солнечного пятна поправка составляет около  $+0.3 \text{ dex}$ , что не изменит обнаруженной тенденции.

В связи с возможной зависимостью величины содержания лития от уровня солнечной активности нужно сделать следующее замечание. Имеются данные о том (Кужевский, 2002), что отношение величин содержания бериллия и лития  $A(\text{Be})/A(\text{Li})$  меняется для Солнца синхронно с солнечным циклом. При этом величина  $A(\text{Be})/A(\text{Li})$  наибольшая в максимумах цикла. Кроме того, известно (Гринштейн, Тандберг-Ханссен, 1953), что бериллий является более устойчивым по сравнению с литием. Выгорание бериллия происходит при температуре свыше 3.6 миллионов градусов, в то время как литий выгорает уже при 2.4 миллионов градусов. Поэтому наиболее вероятным является сценарий, когда отношение  $A(\text{Be})/A(\text{Li})$  меняется за счет изменения величины  $A(\text{Li})$ . В таком случае величина  $A(\text{Li})$  уменьшается в максимумах солнечного цикла, что согласуется с нашими результатами.

Для окончательного решения указанной проблемы необходимы данные для более длительных промежутков времени в разные фазы цикла. Для этого необходимо использовать как новые наблюдения, так и анализ архивных спектров, которые могут содержать линии лития и других вспомогательных элементов.

Мы не включаем в обсуждение результаты определения содержания лития для невозмущенной фотосферы Солнца, так как линии лития в невозмущенных областях очень слабые и результаты могут быть обременены ошибками.

## Литература

- Барановский (Baranovsky E.A.) // *Contr. Astron. Obs. Scalnate Pleso*. 1993. V. 23. P. 107.  
 Барановский Э.А., Тарашук В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2008 Т. 104. № 1. С. 30.  
 Виер и др. (Wier E., Stellmacher G., Schröter E.H.) // *Astrophys. Lett.* 1968. V. 1. P. 181.  
 Гринштейн, Тандберг-Ханссен (Greenstein J.L., Tandberg-Hanssen E.) // *Astrophys. J.* 1953. V. 119. P. 113.  
 Карлссон и др. (Carlsson M., Rutten R.J., et al.) // *Astron. Astrophys.* 1994. V. 288. P. 860.  
 Кужевский Б.М. // *Наука в России*. 2002. Т. 4. С. 4.  
 Ритценхоф и др. (Ritzenhoff S., Schroeter E.H., Schmidt W.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 328. P. 695.  
 Руиз Кобо, дель Торо Иньеста (Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J.C.) // *Astrophys. J.* 1992. V. 398. P. 375.  
 Трауб, Рослер (Traub W., Roesler F.L.) // *Astrophys. J.* 1971. V. 163. P. 629.  
 Шмаль, Шрётер (Schmahl G., Schröter E.H.) // *Z. Astrophys.* 1965. V. 62. P. 143.  
 Энгвольд и др. (Engvold O., Kjeldseth Moe O., Maltby P.) // *Astron. Astrophys.* 1970. V. 9. P. 79.