

УДК 523.985

Определение содержания лития в солнечных пятнах, наблюдения 2011 года

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

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,
АР Крым, Украина, 98409
edward@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 17 декабря 2013 г.

Аннотация. Получены спектры солнечных пятен в областях линий LiI 6708 Å и некоторых линий FeI и CaI. Наблюдения проводились с ПЗС-камерой в январе и августе 2011 г. на телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории. Были рассчитаны модели пятен по наблюдаемым профилям линий FeI, CaI. По моделям пятен и наблюдаемым профилям линии LiI 6708 Å определена величина содержания лития: $\log(N_{\text{Li}}) = 0.98$ и 0.95 (в шкале $\log A(\text{H}) = 12.0$).

LITHIUM ABUNDANCE DETERMINATION IN SUNSPOTS, OBSERVATIONS IN 2011, by *E.A. Baranovsky, S.A. Musorina, V.P. Taraschuk*. Spectra of sunspots in the region of the lithium 6708 Å line and some FeI and CaI lines have been obtained. The observations were carried out with a CCD-camera on January and August 2011 at the telescope TST-2 of the Crimean Astrophysical Observatory. The sunspot models were calculated using the observed profiles of FeI and CaI lines. The lithium abundance was obtained using the calculated spot models and observed LiI 6708 Å line profiles. The value is $\log(N_{\text{Li}}) = 0.98$ and 0.95 (in the scale $\log A(\text{H}) = 12.0$).

Ключевые слова: Солнце, спектры, модели, литий

1 Проблема лития

Литий является очень нестойким элементом, он разрушается при сравнительно низкой температуре около 2.6 млн град. Величина содержания лития очень чувствительна к различным параметрам звездных атмосфер (Асплунд и др., 2006). Определение содержания лития в атмосферах звезд разного типа дает возможность уточнять строение атмосфер и конвективной зоны и уточнять пути эволюции звезд.

До настоящего времени существует ряд нерешенных вопросов, касающихся содержания лития. Так, теория нуклеосинтеза предсказывает втрое большее количество изотопа ${}^7\text{Li}$ во Вселенной, чем следует из наблюдений. Таким образом, имеется противоречие между предсказаниями теории Большого Взрыва и данными о распространенности лития. Что касается других изотопов легких элементов, включая дейтерий, бериллий и бор, их содержания хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями (Гревесс, 1968).

Определение содержание лития...

Наблюдается различная величина содержания лития у звезд с одинаковым возрастом, металличностью и массой. Такое различие говорит о том, что имеются неизвестные свойства, влияющие на скорость разрушения и образования атомов лития.

Проблема лития существует и для Солнца. Величина содержания лития на Солнце на два порядка меньше величины содержания, например, в метеоритах. Такое низкое содержание не объясняется современными моделями строения внутренних областей Солнца. Температура в конвективной зоне недостаточно высокая для выгорания лития. По-видимому, существуют какие-то неизвестные механизмы, вызывающие уменьшение количества лития.

С другой стороны, литий может образовываться в атмосфере звезд и Солнца в результате реакции скалывания во время сильных вспышек или под воздействием космических лучей.

Часто для определения содержания лития используются наблюдения в области линии 6707.8 \AA , поскольку линия 6103 \AA очень слабая и блендирована. В спектре Солнца для невозмущенных областей линия 6707.8 \AA также очень слабая, и получение достаточно точного ее профиля или эквивалентной ширины является сложной задачей. Вследствие низкой температуры в тени пятна степень ионизации лития уменьшается, и интенсивность линии 6707.8 \AA существенно увеличивается. Поэтому определение содержания лития на Солнце выполняется обычно по спектрам солнечных пятен.

2 Расчет содержания лития

Для определения величины содержания сравниваются вычисленные и наблюдаемые профили или эквивалентные ширины линии 6707.8 \AA . Для вычисления профилей нужно знать физические условия в пятне – температуру, плотность и др., т. е. нужно рассчитать модель пятна. Для этой цели одновременно с наблюдением линии лития 6707.8 \AA наблюдаются другие линии, с помощью которых и рассчитывается модель пятна. В данном исследовании мы использовали линии железа $\text{FeI } 6703.6 \text{ \AA}$, 6710.2 \AA и $\text{CaI } 6717.7 \text{ \AA}$. Учитывается также контраст пятна.

Модель пятна рассчитывается путем подбора параметров – так, чтобы получить наилучшее согласие вычисленных и наблюдаемых профилей линий и величины контраста пятна. Величина рассеянного света в пятне определялась с помощью снимков края диска Солнца.

Определение содержания лития по спектрам солнечных пятен сделано в работах разных авторов, начиная с 1956 года: Шмаль, Шрётер (1965), Виер и др. (1968), Трауб, Рослер (1971), Энгвольд и др. (1970), Ритценхоф и др. (1997), Барановский, Тарашук (2008, 2012), Барановский и др. (2012, 2013). Все определения сделаны по наблюдениям линии $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ в ЛТР-приближении. В наших определениях и в работе Ритценхофа и др. (1997) модели пятен рассчитывались, в остальных работах модели взяты из литературы. Даты наблюдений спектров пятен относятся к разным фазам солнечного цикла. На рис. 1 даны результаты определения содержания лития в разные годы и числа Вольфа. Здесь можно видеть, что самые большие значения содержания приходятся на минимумы циклов, а малые значения – на максимумы.

Эта тенденция обнаруживается и на рис. 2, на котором нанесены величины содержания лития в зависимости от интервала времени между моментом наблюдения спектра пятна и ближайшим максимумом солнечного цикла.

Имеются также данные о том, что отношение величин содержания лития и бериллия на Солнце меняется со временем. При этом отношение $A(\text{Be})/A(\text{Li})$ имеет большее значение во время максимума солнечной активности. Поскольку литий выгорает при меньших значениях температуры, чем бериллий, то более вероятным является сценарий, когда от солнечного цикла зависит величина содержания лития – во время максимума количество лития меньше.

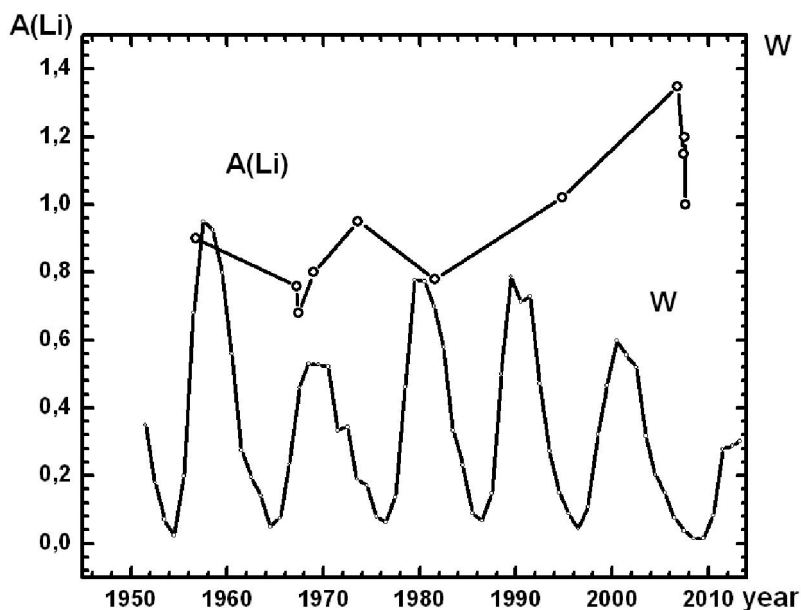


Рис. 1. Величина содержания лития на Солнце в разные годы и числа Вольфа

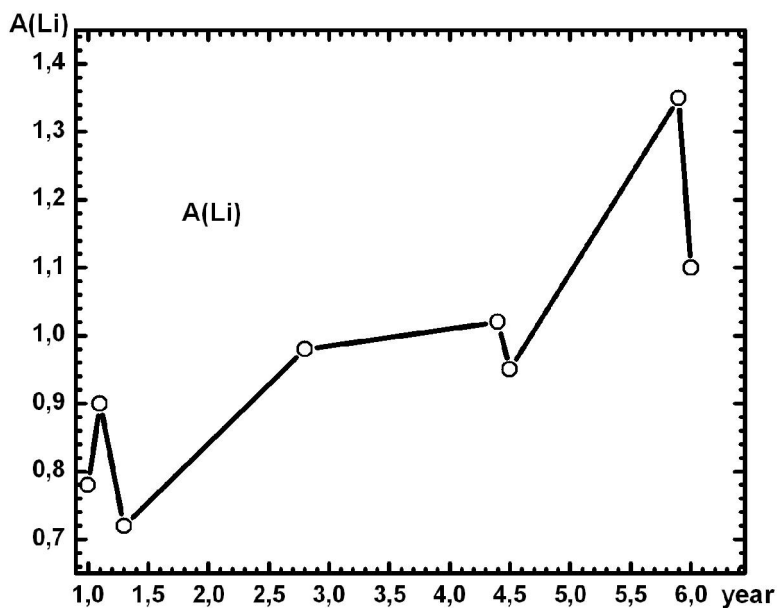


Рис. 2. Величина содержания лития на Солнце в зависимости от фазы солнечного цикла. По оси X – интервал времени между моментом наблюдения и ближайшим максимумом в годах

Для проверки реальности обнаруженной тенденции мы использовали новые наблюдения. В 2011 г. получены спектры в области линии 6707.8 \AA для двух пятен – 6 января и 4 августа. Наблюдения проведены с ПЗС-камерой на телескопе БСТ-2 НИИ “КрАО”. Пятно 6 января имеет диаметр тени $17\text{--}25''$, пятно 4 августа – $20\text{--}40''$. Были измерены эквивалентные ширины линий железа и кальция, по которым рассчитывались модели, а также линии лития 6707.8 \AA .

Определение содержание лития...

Величины измеренных эквивалентных ширин в ангстремах для невозмущенных областей и для спектров пятен 6.01.2011 г. и 4.08.2011 г. приведены в таблице.

Таблица 1. Измеренные эквивалентные ширины в невозмущенных областях и в пятнах

Элемент Линия	Невозм.	6.01.2011 г.		4.08.2011 г.		
FeI 6703.57	0.0490	0.0681	0.0763	0.0688	0.0665	0.0672
FeI 6710.32	0.0270	0.0501	0.0523	0.0512	0.0384	0.0427
CaI 6717.68	0.1434	0.2303	0.2304	0.2347	0.2775	0.3272

Модель пятна (температура и другие параметры) рассчитывается путем подбора параметров так, чтобы получить наилучшее согласие между вычисленными и наблюдаемыми эквивалентными ширинами линий. Удовлетворительным согласием принималось 5–10 % для линии CaI и 10–15 % для линий FeI.

Далее по рассчитанной модели пятна вычисляется эквивалентная ширина линии лития 6708 Å с различными величинами содержания лития и сравнивается с наблюдаемой величиной. Вариант с наилучшим согласием дает нам искомую величину содержания. При этом было принято отношение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.03$. 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 каждого пятна были обработаны несколько спектров, полученных с интервалом в несколько минут. Результаты определения величины содержания по отдельным спектрам усреднялись. Окончательный результат $\log(A(\text{Li})) = 0.98$ для пятна 6.01.2011 г. и $\log(A(\text{Li})) = 0.95$ для пятна 4.08.2011 г.

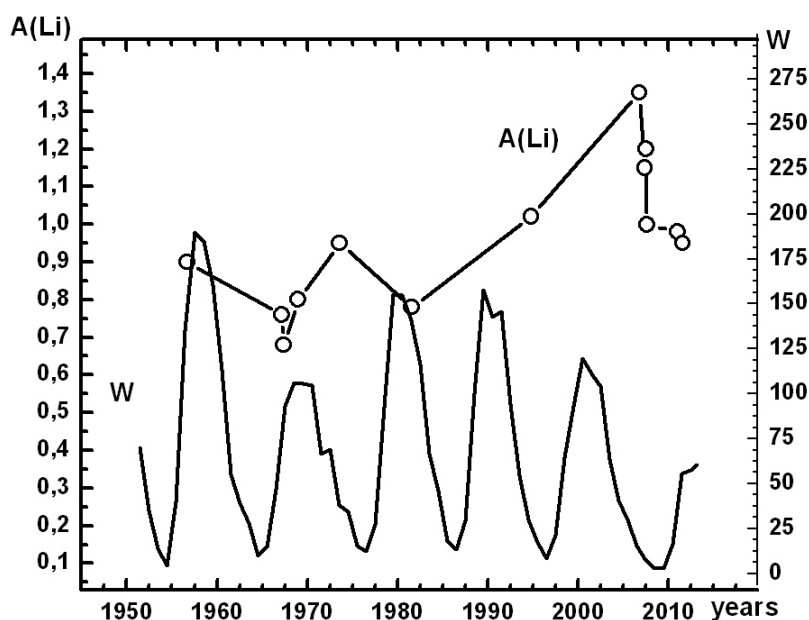


Рис. 3. Величина содержания лития в солнечных пятнах, по результатам разных авторов в разные годы, и числа Вольфа

Рассчитанные величины мы добавили к полученным ранее величинам содержания лития. Рисунок 3 показывает, что отмеченная выше тенденция в поведении лития сохраняется.

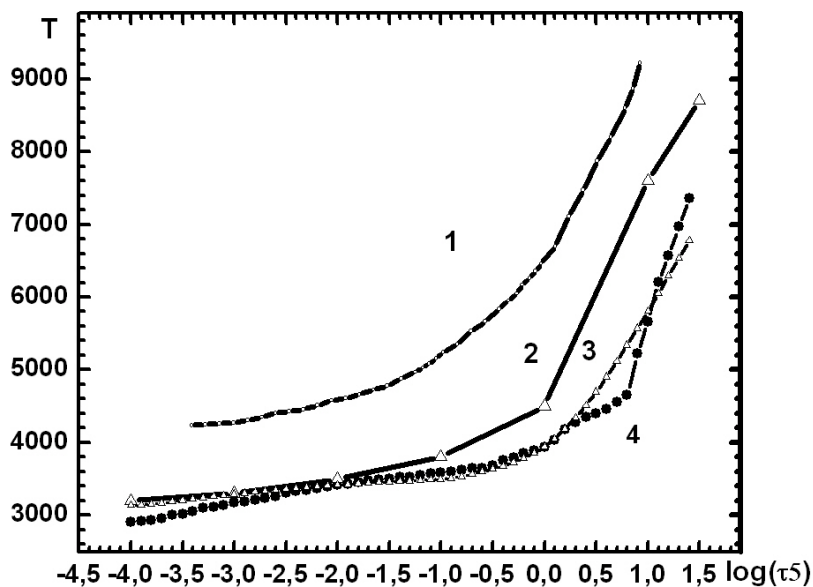


Рис. 4. Температура в моделях пятен и в невозмущенной фотосфере. 1 – невозмущенная фотосфера, 2 – модель пятна Ритценхофа и др. (1997), 3 – модель пятна Колладос и др. (1994), 4 – модель пятен, рассчитанная нами в данном исследовании

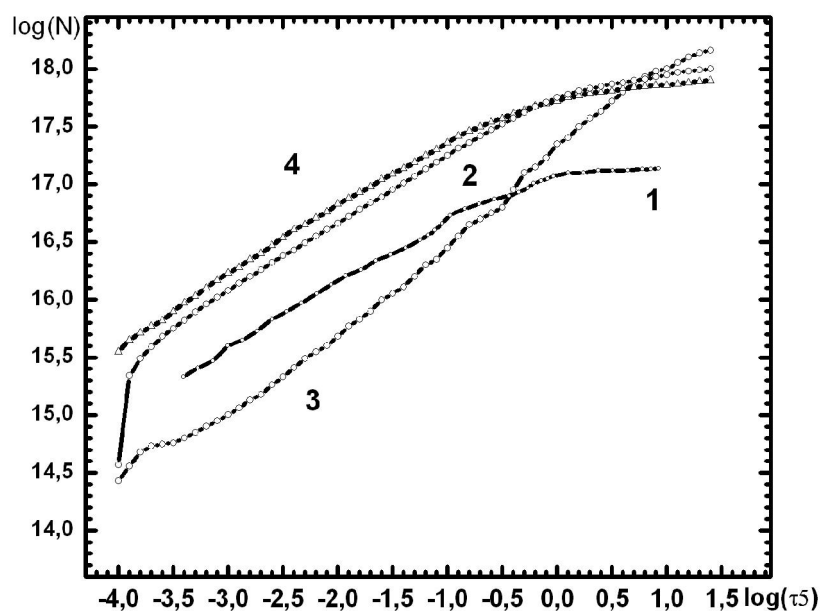


Рис. 5. Плотности в моделях пятен и в невозмущенной фотосфере. 1 – невозмущенная фотосфера, 2 – модель пятна Колладос и др. (1994), 3 и 4 – модели пятен данного исследования за 6.01.2011 и 4.08.2011 гг.

Определение содержание лития...

Температура и плотность в рассчитанных нами моделях показаны на рис. 4 и 5. Модели двух пятен практически не различаются по температуре, но плотность в модели первого пятна 6.01.2011 г. меньше на порядок.

3 Заключение

1. По наблюдаемым спектрам пятен 6 января 2011 г. и 4 августа 2011 г. в области линии лития 6708 \AA измерены эквивалентные ширины линий железа, кальция и линии лития 6708 \AA .
2. По наблюдаемым профилям линий железа и кальция и величине контраста пятна рассчитаны модели пятен.
3. По вычисленным моделям пятен рассчитаны эквивалентные ширины линии $\text{LiI } 6708 \text{ \AA}$ для разных величин содержания Li и проведено сравнение с наблюдаемыми величинами. Полученное таким образом содержание лития составляет $A(\text{Li}) = 0.98$ и $A(\text{Li}) = 0.95$ для пятен 6 января и 4 августа 2011 года соответственно.
4. Значения величин содержания, полученные в разных работах за последние 55 лет, обнаруживают две тенденции:
 - а) увеличение содержания лития со временем за период 1956–2011 гг.
 - б) наибольшие величины содержания наблюдались в минимумах солнечной активности, наименьшие величины содержания относятся к максимумам цикла. Этот факт может указывать на то, что на величину содержания лития влияет изменение физических процессов на Солнце в течение солнечного 11-летнего цикла.

Литература

- Асплунд и др. (Asplund M., Lambert D.L., Nissen P.E., et al.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 644. P. 229.
- Барановский Э.А., Тарашук В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2008. Т. 104. № 1. С. 30.
- Барановский Э.А., Тарашук В.П. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2012. Т. 28. № 5. С. 50.
- Барановский Э.А., Мусорина С.А., Тарашук В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2012. Т. 108. № 1. С. 26.
- Барановский Э.А., Мусорина С.А., Тарашук В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2013. Т. 109. № 1. С. 165.
- Виер и др. (Wier E., Stellmacher G., Schröter E.H.) // *Astrophys. Lett.* 1968. V. 1. P. 181.
- Гревесс (Grevesse N.) // *Solar Phys.* 1968. V. 5. P. 159.
- Колладос и др. (Collados M. et al.) // *Astron. Astrophys.* 1994. V. 291. P. 622.
- Ритценхоф и др. (Ritzenhoff S., Schröter E.H., Schmidt W.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 328. P. 695.
- Трауб, Рослер (Traub W., Roesler F.L.) // *Astrophys. J.* 1971. V. 163. P. 629.
- Шмаль, Шрётер (Schmahl G., Schröter E.H.) // *Zeitschr. Astrophys.* 1965. V. 62. P. 143.
- Энгвольд и др. (Engvold O., Kjeldseth Moe O., Maltby P.) // *Astron. Astrophys.* 1970. V. 9. P. 79.