

УДК 523.985

Содержание лития в солнечных пятнах

Э.А. Барановский, В.П. Таращук

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 15 ноября 2007 г.

Аннотация. Наблюдения лития проводились на БСТ-2 в Крымской обсерватории с 15 по 20 августа 2006 г. Была рассчитана модель пятна для дат наблюдений. Определено содержание лития в пятне и в невозмущенной фотосфере. Оно составило $Lg(N_{Li}) = 1.35$. для пятна и $Lg(N_{Li}) = 1.05$ для невозмущенной фотосферы.

THE LITHIUM ABUNDANCE IN SUNSPOTS, by E.A. Baranovsky, V.P. Tarashchuk. The observations of lithium were carried out with TST-2 at the Crimean observatory on August 15–20, 2006. The spot model for observation dates was estimated. The lithium abundance in a sunspot and in the undisturbed photosphere was detected. It equals $Lg(N_{Li}) = 1.35$. for the sunspot and $Lg(N_{Li}) = 1.05$ for the undisturbed photosphere.

Ключевые слова: Sun, spectra, model, lithium

1 Проблема лития

Третий элемент периодической системы литий играет большую роль в решении многих проблем современной астрофизики, таких как образование во Вселенной химических элементов, происхождение и эволюционный статус звезд, их внутренняя структура и др. Литий, возникший при Большом взрыве, должен был большей частью исчезнуть к настоящему времени. Однако современное содержание Li в межзвездном газе раз в 10 выше, чем было в период формирования Галактики, когда химический состав среды отражал результат космического нуклеосинтеза. Полагают, что сейчас литий формируется в межзвездном пространстве при столкновении тяжелых атомов с высокоскоростными частицами космических лучей, когда тяжелые атомы распадаются. Образующиеся из облаков межзвездного газа молодые звезды и сейчас содержат такой литий.

Обилие лития зависит от возраста звезды и ее эволюции. Принято считать, что количество лития в звездах поздних классов коррелирует с другими характеристиками – массой, возрастом, хромосферной активностью, скоростью вращения. У звезд поздних классов главной последовательности с глубокими конвективными зонами Li должен исчезнуть за относительно короткое время. Наблюдающийся иногда в атмосферах предельно старых звезд Li выносится в верхние слои атмосферы после ядерной вспышки в глубине звезды легкого изотопа гелия 3He . Так как такие звезды активно теряют вещество из оболочки, то Li вместе с ним попадает в межзвездную среду и входит затем в состав рождающихся звезд.

Изучение звездного Li осложняется большим разнообразием его поведения на звездах разного типа. Солнце как звезда главной последовательности представляется более подходящим объектом

ввиду его близости и относительной стабильности поведения. На Солнце линии Li заметны в пятнах и практически отсутствуют в фотосфере. Литий относится к магниточувствительным элементам. Важно исследовать изменение спектральных характеристик лития и других элементов в пятнах с различными физическими характеристиками; провести спектральный мониторинг для выяснения изменения параметров спектра при развитии одного и того же пятна со временем. В последние десятилетия изучению солнечного лития уделялось недостаточно много внимания. Цель нашего исследования – наблюдение лития на Солнце для определения его обилия.

2 Литий на Солнце

Поведение лития и других легких щелочных элементов на Солнце, так же как и на звездах, относится к числу малоисследованных ключевых проблем современной астрофизики. В атмосфере Солнца лития в 100 раз меньше, чем в окружающем межзвездном веществе. Это следствие того, что литий выгорает при сравнительно низкой температуре (больше $2.4 \times 10^6 K$). Но литий может и образовываться в атмосфере звезды в результате ядерной реакции с участием легкого изотопа гелия 3He . Для Солнца известен класс вспышек, во время которых образуются космические лучи, в составе которых помимо протонов, ядер гелия и др. наблюдается высокое содержание 3He . Поэтому можно ожидать, что вспышки оказывают влияние на образование и поведение лития. Пространственное разрешение деталей на Солнце позволяет выяснять связь свечения лития со структурными образованиями. Разнообразные наблюдения Солнца представляют несравненно больше возможностей более подробного изучения лития, чем наблюдения звезд.

Литий на Солнце присутствует в основном в виде двух изотопов – 6Li и 7Li , которые разрушаются при температурах $\sim 2.2 \times 10^6 K \div 2.6 \times 10^6 K$. Как щелочной металл литий характеризуется наличием одного внешнего s-электрона, переход которого на более высокие уровни приводит к возникновению спектров с хорошо выраженными спектральными сериями, аналогично K, Na, Cs и др. При резонансном переходе 2s – 2p образуются максимальные по интенсивности спектральные линии. Наличие у электрона спина обуславливает тонкую структуру уровней и спектральных линий. Дублетное расщепление у Li образует линии 6707.95 Å и 6707.90 Å (у Na – 5895.92 Å и 5889.95 Å). Доля 6Li составляет 7.5 % в межзвездной среде и около 3 % на Солнце. В спектре невозмущенного Солнца линия Li очень слабая (0.97), но в ядре пятна из-за более низкой температуры линия заметно усиливается. От температуры зависит ионизация Li, а в невозмущенных областях ионизация очень сильная, и нейтрального Li мало. Количество ионизованного лития на Солнце превышает количество нейтральных атомов более чем в 600 раз, но его линии находятся в далеком ультрафиолете. Кроме резонансного дублета 6708 Å в солнечном спектре присутствует также линия 6103 Å, но она очень слабая и сильно блендирована. Для наблюдений наиболее пригодна линия 6708 Å.

В настоящее время имеющиеся данные о поведении лития и других легких щелочных элементов на Солнце не позволяют получить окончательную модель свечения лития, которая была бы в согласии с наблюдениями. Немногочисленные работы, где приводятся данные о наблюдении лития, выполнены давно и с менее совершенными наблюдательными и вычислительными средствами. Полученные ранее величины содержания лития отличаются одна от другой в несколько раз. Причина этого пока не выяснена – связано ли это с неточностями определений (например, из-за неточности учета рассеянного света), различной методикой получения спектральных параметров, или это следствие меняющихся условий при развитии активных областей, т. е. имеют место временные и пространственные зависимости поведения лития на Солнце.

3 Наблюдения

Наблюдения проводились с ПЗС-камерой на телескопе БСТ-2 со спектрографом с дифракционной решеткой 1200 штр/мм. ПЗС-камера VS-СТТ 249 имеет размер рабочего поля матрицы 752x582 пикселей, что обеспечивало спектральное разрешение 0,01 Å/пиксел. Пространственное разрешение составляло $\sim 0,3''$ /пиксел.

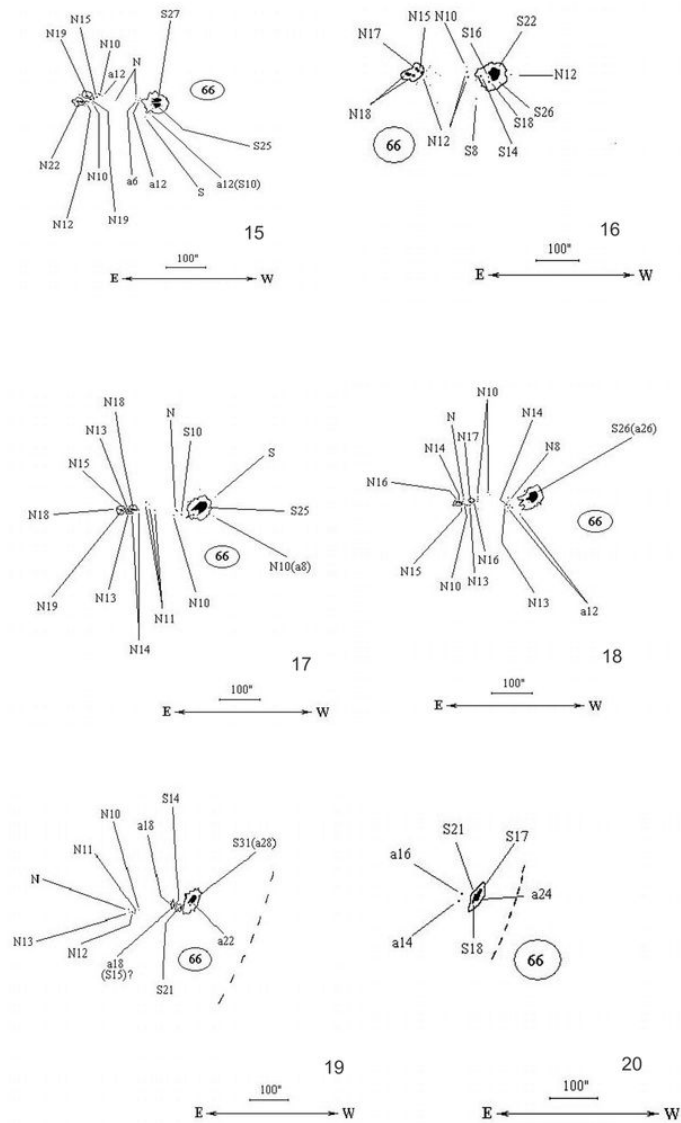


Рис. 1. Развитие активной области, в которой наблюдалось пятно в процессе его изменений за время с 15 по 20 августа 2006 г.

Необходимо отметить, что предварительно было проведено исследование работы матрицы в разных режимах и по определению плоского поля в исследуемых спектральных областях. Наблюдения нескольких контуров спектральных линий в невозмущенных областях после обработки сравнивались с соответствующими линиями атласа Дельбюля (Дельбюль, 1973). Такое сравнение не показало существенных различий, что позволило с уверенностью использовать нашу методику при наблюдении спектров пятен для определения содержания лития.

Для определения обилия лития наблюдения спектров лития, натрия, некоторых линий кальция, железа, титана проводились 15–20 августа 2006 г. в пятне активной области. Наблюдалось ведущее пятно группы, имеющее величину до $60''$, с размером ядра, имевшем в разные даты величину от

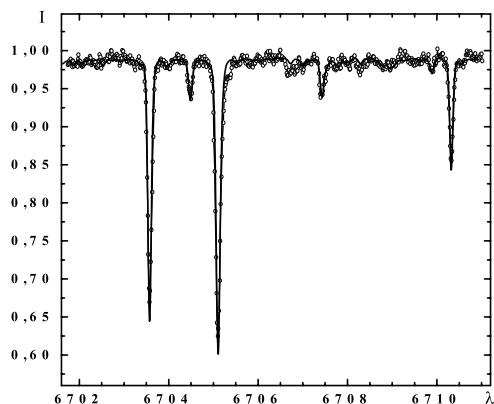


Рис. 2. Сравнение наблюдаемого невозмущенного спектра в области Li 6708 Å с атласом Дельбюля (сплошная жирная линия)

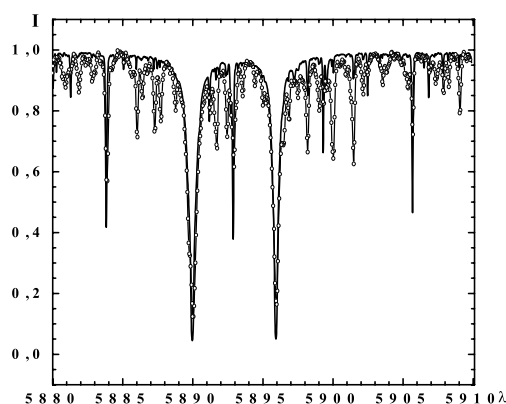


Рис. 3. Сравнение наблюдаемого невозмущенного спектра в области линий D NaI с атласом Дельбюля (сплошная жирная линия)

15'' до 30'' На рис. 1 показаны изменения, происходившие с пятном за время наблюдений с 15 по 20 августа 2006 года при смещении его к западному краю Солнца, по данным наблюдений на БСТ-2, выполненных в те же дни для определения магнитного поля. Для каждой даты представлены величины измеренных магнитных полей в условных единицах, получаемых в КраО.

Щель спектрографа шириной 0.05 мм была ориентирована примерно перпендикулярно к направлению суточной параллели и разрежала пятно так, что регистрировались полутень, пятно и участки фотосферы вне пятна. Затем щель наводилась на невозмущенный участок в центре Солнца, и наблюдения повторялись при тех же параметрах работы аппаратуры. Экспозиции составляли доли секунд. Проводились серии записей спектра при разных параметрах работы матрицы, так что спектры пятна могли быть разной плотности, что позволяло отобрать для обработки наиболее качественные по плотности изображения.

4 Контуры спектральных линий в невозмущенной области

Определение содержания лития можно сделать посредством сравнения наблюдаемого контура линии с вычисленным по модели. При таких расчетах необходимо подобрать величину содержания элемента так, чтобы вычисленные и наблюдаемые профили линий совпали. При расчете профиля линии 6708 Å в невозмущенной области используется стандартная модель фотосферы. При расчете линии в солнечном пятне нужно задать модель пятна, которая определяется зависимостью температуры T , плотности, турбулентной скорости v_t и напряженности магнитного поля H от глубины. Модель должна соответствовать конкретному пятну, так как пятна различаются по своим параметрам, т. е. нужно было рассчитать модель наблюдаемого пятна. Приблизительную модель можно получить из наблюдаемого контраста пятна. При этом получаем температуру пятна на уровне образования непрерывного спектра, то есть в области нижней фотосферы. Однако остается неопределенной величина плотности в модели и температура более высоких слоев, т. е. в средней и верхней фотосфере. Образование линий, в том числе и лития, как раз происходит именно в средней и верхней фотосфере. Поэтому для расчета более точной модели пятна нужно использовать кроме контраста наблюдаемые профили нескольких других линий. С этой целью одновременно с литием 6708 Å наблюдались линии Ca I 6103 Å и 6162 Å, линии Ti I, Na I, Fe I и D линии Na I. Эти же участки спектров регистрировались и в невозмущенных областях Солнца, что необходимо для

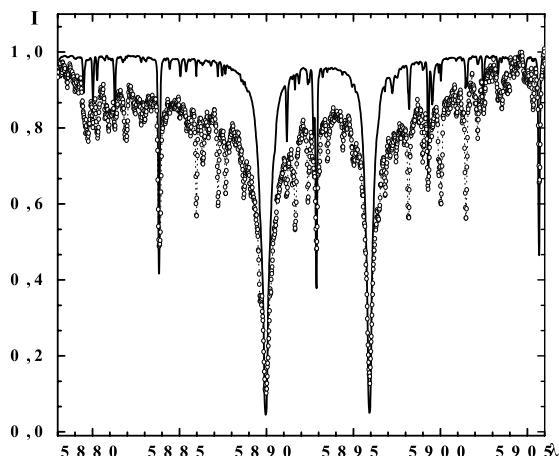


Рис. 4. Сравнение наблюдаемого спектра пятна в области линий D NaI с атласом Дельбюля (сплошная жирная линия)

проверки точности наблюдений и для уточнения атомных параметров используемых линий – сил осцилляторов gf и величины уширения.

Сравнение наблюдаемых профилей линий Fe, Li, Na D и Ca I 6162 Å в невозмущенной области Солнца и в атласе Дельбюля показало хорошее соответствие контуров линий. Некоторые различия профилей вызваны значительным усилением атмосферных линий, особенно заметным в области линий Na D. На рисунках 2 и 3 показан вид контуров линий области Li и Na D.

5 Контурные спектральных линий в пятне

Кроме линии лития 6708 Å в пятне также наблюдались линии Ca I 6103 Å и 6162 Å, Fe I Ti I и D линии Na I. Для примера на рисунке 4 приводятся наблюдавшиеся в пятне линии D дублета NaI (штриховая линия) и аналогичные линии из атласа Дельбюля (сплошная линия). Видны различия профилей линий и присутствие многочисленных атмосферных линий при наблюдении спектра пятна.

По наблюдаемым профилям линий и величине контраста пятна рассчитываем модель пятна. Модель определяется путем подбора параметров модели так, чтобы вычисленные профили линий и контраст пятна были близки к наблюдаемым. Для вычисления профилей линий мы использовали разработанную нами LTE-программу и любезно предоставленную нам авторами испанскую LTE-программу SIR (Пуиз Кобо, 1992).

Сравнение вычисленных по окончательной модели профилей (жирная линия) с наблюдаемыми (пунктир) дается на рисунках 5, 6 и 7. Для сравнения там же приведены контуры линий из атласа Дельбюля (сплошная верхняя кривая). Оставшиеся различия между вычисленными и наблюдаемыми окнтурами не удастся устранить при одновременном согласовании всех линий. Для одной конкретной линии можно получить лучшее согласие контуров.

Отметим, что при расчетах производился учет рассеянного света. Для этого выполнялись спектральные наблюдения края Солнца со щелью, располагавшейся вдоль радиуса диска. Величина рассеянного света составляла 20 %.

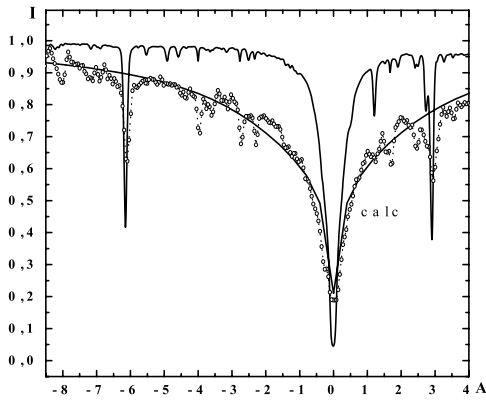


Рис. 5. Сравнение наблюдаемого спектра пятна в области линий D NaI (пунктир) с вычисленным по найденной модели пятна (calc) и контуром Дельбюля (сплошная верхняя жирная линия)

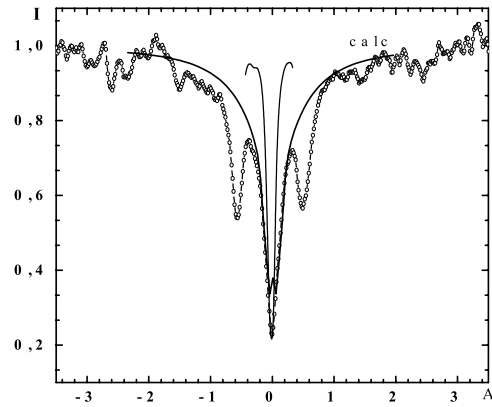


Рис. 6. Сравнение наблюдаемого спектра пятна в области линии CaI 6103 Å (пунктир) с вычисленным (calc) по найденной модели пятна и контуром Дельбюля

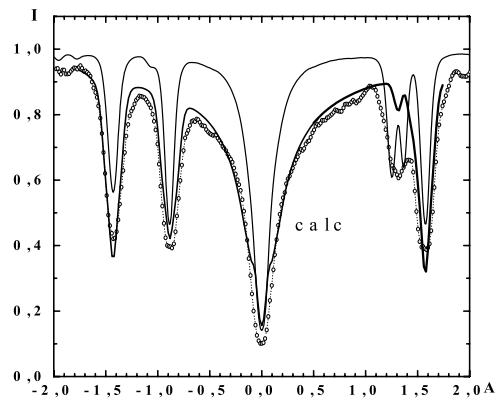


Рис. 7. Сравнение наблюдаемого спектра пятна в области линии CaI 6162 Å (пунктир) с вычисленным (calc) по найденной модели пятна. Верхняя кривая из атласа Дельбюля

Для сравнения нашей модели пятна и полученных ранее моделей (Ритценхоф, 1997; Штельмахер, 1975), приводятся рисунки 8 и 9, где показан ход температуры и плотности в моделях с оптической глубиной. Видно, что в нашей модели в нижней фотосфере температура T меньше, чем в модели Ритценхофа. Соответственно и контраст пятна меньше, у нас он составлял 0.11–0.12, у Ритценхофа – 0.21. Профиль линии лития Li 6708 Å в наших наблюдениях оказался более глубоким, чем у Ритценхофа. Наша модель оказалась очень близкой по температуре к модели Штельмахера-Виера (Штельмахер, Виер, 1975) и Колладоса (Колладос и др., 1994).

Плотность в нашей модели больше плотности невозмущенной фотосферы. В верхней фотосфере плотности отличаются не сильно, а в нижней фотосфере плотность в модели в 10 раз больше невозмущенной. В моделях Штельмахера и Колладоса плотность также большая. Ритценгоф не сообщает

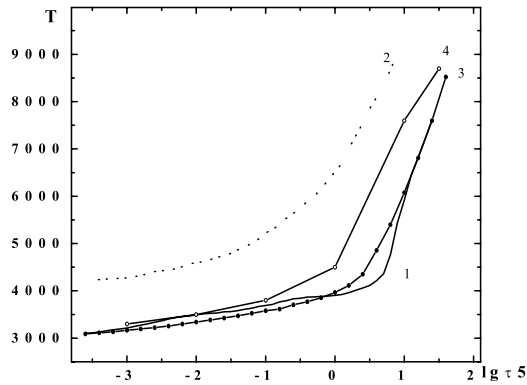


Рис. 8. Температура в рассчитанной модели пятна (1), в модели невозмущенной области (кривая 2), в модели Ритценхофа и др. (кривая 4) и в модели Штельмахера-Виера (Штельмахер, Виер, 1975), (кривая 3)

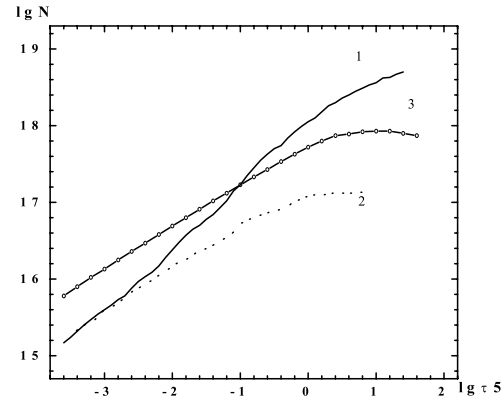


Рис. 9. Плотность в рассчитанной модели пятна (кривая 1), в модели невозмущенной области (кривая 2) и в модели Штельмахера-Виера (кривая 3)

величину плотности в своей модели.

Магнитное поле в нашей модели получилось от 1000 гс в верхней фотосфере до 3000 гс в нижней фотосфере. С этой моделью пятна мы рассчитываем профили линии Li 6708 Å, задавая различную величину содержания лития и проводя сравнение с наблюдаемыми профилями.

6 Вычисление контура линии лития 6708 Å и обсуждение результатов

Содержание лития на Солнце определялось разными авторами в прошлом. Результаты разных определений различаются довольно сильно – до 2.5 раз. А в работе Гринштейна (Гринштейн, Ричардсон, 1951) величина содержания составляла $Lg(N_{Li}) = 0.7-1.6$, т. е. было 8-кратное различие. Дубов (Дубов, 1967) определил содержание лития в пятне, используя эквивалентные ширины линий Li 6708 Å, Al I 5557 Å, Na I 5153 Å и 5149 Å с помощью кривой роста и получил $Lg(N_{Li}) = 1.2$. Шмаль (Шмаль, Шрётер, 1965), Виер (Виер и др., 1968), Энгвольд (Энгвольд и др., 1970) определяли содержание лития по спектрам пятен и получили значения $Lg(N_{Li})$ соответственно 0.90, 0.76, 0.80. В этих трех исследованиях не рассчитывалась модель пятна, она была взята из других источников, что снижает точность определения.

Мюллер (Мюллер и др., 1975) нашли для невозмущенного Солнца $Lg(N_{Li}) = 1.0$, а Павленко (Павленко, 1989), также для невозмущенного Солнца, получил $Lg(N_{Li}) = 1.08$ для ЛТР-вычислений и $Lg(N_{Li}) = 1.21$ для не-ЛТР вычислений.

Последнее определение содержания лития в солнечном пятне сделано в 1997 году (Ритценхоф и др., 1997). В работе приведены ссылки на предыдущие исследования с результатами найденного содержания лития. Отметим, что это единственная статья, где рассчитывается модель для исследуемого пятна по наблюдениям профилей нескольких линий.

На рис. 10 показаны изменения поведения профилей линии лития в пятне по нашим наблюдениям в разные дни: 15, 16, 17, 18, 19, 20 августа 2006 года. Отметим, что 20 августа пятно было очень близко к лимбу, глубина контура наименьшая.

Профили линии 6708 Å рассчитывались как бленда, состоящая из 10 компонент. Все компоненты являются переходами между разными подуровнями 7Li и 6Li . Для расчетов было взято общепри-

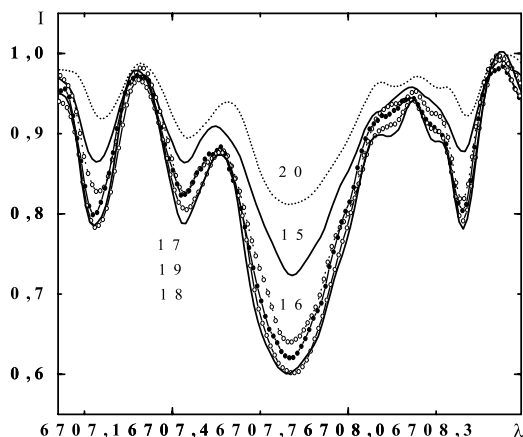


Рис. 10. Наблюдаемые профили линии Li 6708 Å в пятне в разные дни : 15, 16, 17, 18, 19, 20 августа 2006 г. Даты наблюдений указаны сверху вниз

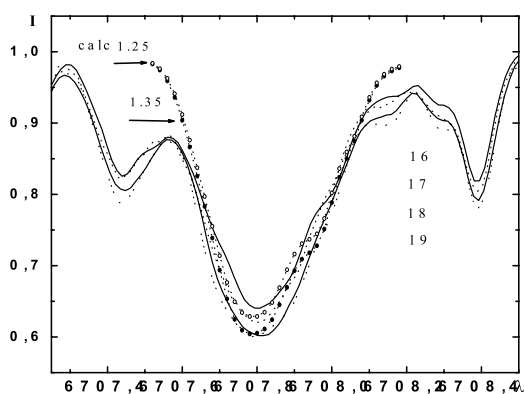


Рис. 11. Сравнение наблюдаемых профилей линии Li 6708 в пятне (16–19.08.06) с вычисленными по модели пятна для величины содержания лития $Lg(N_{Li})_{1.251.35}$

нятое для Солнца отношение содержания ${}^6Li/{}^7Li = 0.03$. Сравнение профилей линии Li 6708 Å из наших наблюдений с профилем из наблюдений Ритценхофа (Ритценхоф и др., 1997) показало, что глубина последнего несколько меньше (примерно на 0.05).

Сравнение вычисленных и наблюдаемых профилей линии 6708 Å для наблюдений 16–19 августа 2006 г. показано на рис. 11. Для всех вычислений использовалась одна и та же рассчитанная модель пятна. Наилучшее согласие вычисленных и наблюдаемых профилей получено для содержания лития равным $lgN_{Li} = 1.25 - 1.35$ (для $lgN_H = 12$). Учитывая возможные ошибки, в частности ошибку определения рассеянного света, окончательный результат имеет вид:

$$Lg(N_{Li}) = 1.3 \pm 0.2$$

Мы рассчитывали профили линии лития 6708 Å по LTE-программе. Для оценки влияния не-LTE

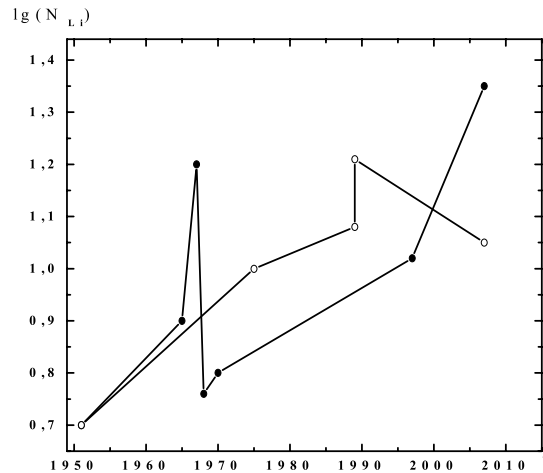


Рис. 12. Изменение содержания лития в пятнах (заполненные кружки) и в невозмущенной фотосфере (открытые кружки) с течением времени

эффектов мы воспользовались результатами статьи Карлсона (Карлсон и др., 1994). В этом исследовании получено, что для Солнца при величине содержания лития 1.0 – 2.6 различие между определениями содержания по LTE и не-LTE расчетам составляет не более 0.05, при этом $Lg(N_{Li})(\text{не-LTE}) > Lg(N_{Li})(\text{LTE})$. С учетом этой поправки окончательный результат имеет вид:

$$Lg(N_{Li}) = 1.35 \pm 0.2.$$

Мы определили также содержание лития в невозмущенной фотосфере по наблюдаемым профилям линии 6708 Å в невозмущенной области. Эти расчеты сделаны тем же методом с применением тех же программ. В результате для спокойной фотосферы получено значение $Lg(N_{Li}) = 1.05 \pm 0.2$. Ниже в таблице приводятся величины содержания лития в разное время, полученные разными авторами.

На рис. 12 показаны величины содержания, полученные в разные годы. Намечается тенденция увеличения содержания лития в пятнах с течением времени (точка 1967 г. определялась по фотографическим наблюдениям, и точность ее могла оказаться меньше по сравнению с другими). В невозмущенной фотосфере прослеживается тот же ход. Для более определенных выводов необходимы дальнейшие наблюдения, потому что эффект может быть связан либо с реальными физическими процессами на Солнце, либо с улучшением качества применяемой регистрирующей аппаратуры.

7 Выводы

1. Получены спектры пятна для 6 дней наблюдений в области лития 6708 Å и нескольких других линий.
2. По наблюдениям профилей линий Na, Ca, Ti, Fe и величине контраста пятна рассчитана модель пятна.
3. По полученной модели пятна рассчитаны профили линии лития 6708 Å для разных величин содержания Li, и проведено сравнение с наблюдаемыми профилями. Величина содержания лития в пятне составила

Таблица 1. Содержание лития на Солнце

| Lg(NLi) | Место наблюдения | Дата | Авторы |
|----------------|------------------------|------|---|
| 0.7–1.6 | Невозм. обл., полутень | 1951 | Greenstein I.L., Richardson R.S. |
| 0.90 | Пятно | 1965 | Schmahl G., Schröter E.H. |
| 1.2 ± 0.3 | Пятно | 1967 | Дубов Э.Е. |
| 0.76 | Пятно | 1968 | Wier E., Stellmacher G., Schröter E.H. |
| 0.80 | Пятно | 1970 | Engvold O., Kjeldseth Moe O., Maltby P. |
| 1.00 ± 0.1 | Невозм. обл. | 1975 | Muller E.A., Peytremann E., de la Reza R. |
| 1.08 | Невозм. обл., ЛТР | 1989 | Павленко Я.В. |
| 1.21 | Невозм. обл., не-ЛТР | 1989 | Павленко Я.В. |
| 1.02 | Пятно | 1997 | Ritzenhoff S., Schröter E.H. |
| 1.35 ± 0.2 | Пятно | 2007 | Барановский Э.А., Таращук В.П. |
| 1.05 ± 0.2 | Невозмуц. фотосфера | 2007 | Барановский Э.А., Таращук В.П. |

$$Lg(NLi) = 1.35 \pm 0.2,$$

что в 1.5–2 раза больше результатов определений другими авторами за последние годы. Для невозмущенной фотосферы мы получили величину содержания лития

$$Lg(NLi) = 1.05 \pm 0.2.$$

В пятне содержание лития оказалось больше, чем в невозмущенной фотосфере.

Отмечается тенденция изменения содержания лития со временем. Поэтому авторы намерены провести дальнейшие наблюдения и соответствующие расчеты.

Литература

- Вьер Э. и др. (Wier E., Stellmacher G., Schröter E.H.) // *Astrophysical Letters*. 1968. V. 1. P. 181.
- Гринштейн И.Л., Ричардсон Р.С. (Greenstein I.L., Richardson R.S.) // *Astroph. J.* 1951. V. 113. P. 536.
- Дельбюль Л. и др. (Delbouille L., Neven L. and Roland C.) // “Photometric Atlas of the Solar Spectrum from A3000. to A10 000”. 1973. Liege.
- Дубов Э.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1967. Т. 36. С. 87.
- Карлсон М. и др. (Carlsson M. et al.) // *Astron. Astrophys.* 1994. V. 288. P. 860.
- Колладос М. и др. (Collados M. et al.) // *Astron. Astrophys.* 1994. V. 291. P. 622.
- Мюллер Э.А. и др. (Muller E.A., Peytremann E., de la Reza R.) // *Solar Physics*. 1975. V. 41. P. 53.
- Павленко Я.В. // *КФНТ*. 1989. Т. 5. № 6. С. 55.
- Ритценхоф С. и др. (Ritzenhoff S., Schröter E.H., Schmidt W.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 328. P. 695.
- Руиз Кобо Б. (Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J.C.) // *Astroph. J.* 1992. V. 398. P. 375.
- Шмаль Г., Шрётер Э.Х. (Schmahl G., Schröter E.H.) // *Z. Astrophys.* 1965. V. 62. P. 143.
- Штельмахер Г., Вьер Э. (Stellmacher G., Wier E.) // *Astron. Astrophys.* 1975. V. 45. P. 69.
- Энгвольд О. и др. (Engvold O., Kjeldseth-Moe O., Maltby P.) // *Astron. Astrophys.* 1970. V. 9. P. 79.