



УДК 523.982+52–337

К вопросу о временных изменениях магнитного поля в мелкомасштабных силовых трубках в течение 11-летнего цикла солнечной активности

В.Г. Лозицкий

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

Критически анализируется работа В.А.Котова [1], содержащая важные результаты об изменениях общего магнитного поля Солнца, измеренного в КраО по линиям FeI 5247.1 и 5250.2Å в период 2001–2011 гг. Аргументируется вывод о том, что полученные наблюдательные данные свидетельствуют о действительных изменениях напряженности магнитного поля в мелкомасштабных силовых трубках. Вероятно, напряженности в таких трубках изменяются в зависимости от фазы солнечного цикла следующим образом: максимальные значения поля возникают в них вблизи минимума чисел Вольфа, тогда как минимальные — через 2–4 года после максимума солнечного цикла. Из сопоставления этих изменений с визуальными измерениями магнитного поля в пятнах [2, 3] следует вывод, что напряженности магнитного поля в крупных пятнах (22–44 Мм) и пространственно неразрешимых силовых трубках идут в противофазе с точностью до одного года.

ДО ПИТАННЯ ПРО ЧАСОВІ ЗМІНИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В МАЛОМАСШТАБНИХ СИЛОВИХ ТРУБКАХ ВПРОДОВЖ 11-РІЧНОГО ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ, Лозицкий В.Г. — Критично аналізується робота В.А.Котова [1], що містить важливі результати вимірювань загального магнітного поля Сонця, спостереженого в КраО по лініях FeI 5247.1 та 5250.2Å за період 2001–2011 рр. Аргументується висновок, що отримані спостережені дані свідчать про дійсні зміни напруженості магнітного поля в маломасштабних силових трубках. Ймовірно, напруженості в таких трубках змінюються з фазою сонячного циклу наступним чином: максимальні значення поля виникають в них поблизу мінімуму чисел Вольфа, тоді як мінімальні — через 2–4 роки після максимуму сонячного циклу. З співставлення цих змін з візуальними вимірюваннями магнітного поля в плямах [2, 3] випливає висновок, що напруженості магнітного поля у великих плямах (22–44 Мм) і просторово нероздільних силових трубках змінюються у протифазі з точністю до одного року.

TO THE PROBLEM OF TEMPORAL CHANGES OF MAGNETIC FIELDS IN SMALL-SCALE MAGNETIC FLUXTUBES DURING 11-YEARS CYCLE OF SOLAR ACTIVITY, by Lozitsky V.G. — We critical analyze paper by V.A.Kotov [1], what contains the important results of observations of total magnetic field of the Sun observed in Crimea astrophysical observatory in FeI 5247.1 and 5250.2Å lines during 2001–2011. A conclusion is argued that obtained observational data indicate the true magnetic field changes in small-scale flux tubes. Likely, magnetic field strengths in such fluxtubes change with solar cycle phase in the following way: maximum field values arise nearly the minimum of sunspots number, whereas minimum one — 2–4 years after peak of solar cycle. From comparison of named changes with visual measurements of magnetic fields in sunspots [2, 3] follows that magnetic field strength in large sunspots (22–44 Mm) and spatially unresolved fluxtubes change in opposite phase with difference no more than one year.

Ключевые слова: Солнце; магнитные поля; пятна; силовые трубки.

Key words: Sun; magnetic fields; sunspots; fluxtubes.

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнце — единственная из звезд, у которой можно измерять локальные магнитные поля прямыми спектроскопическими методами. Правда, это справедливо лишь для наиболее крупных магнитных образований — солнечных пятен, пор и магнитных узлов, т.е. образований с размерами не менее 70 км. Предел прямого пространственного разрешения для лучших современных солнечных телескопов 70–100 км, и если на Солнце существуют еще более мелкие магнитные структуры, они пространственно не разрешаются. По оценкам авторов работ [4, 11] действительный диаметр предельно мелкомасштабных силовых трубок не превышает 40–50 км. Фактические напряженности в таких неразрешимых структурах невозможно определить из прямых наблюдений и поэтому здесь необходимы какие-то иные, специальные методы.

Один из таких методов предложен Я.О.Стенфлю ровно 40 лет назад [9]. Первоначально использовались наблюдения продольных магнитных полей в спокойных областях при разрешении $2.3'' \times 2.3''$. Измерения выполнены в двух линиях, FeI 5247.1 и 5250.2Å, имеющих практически одинаковые потенциалы возбуждения нижнего уровня, силы осцилляторов и профили линий. Эти линии отличаются лишь факторами Ланде, которые равны для них 2.0 и 3.0, соответственно. Такие линии, как можно ожидать, формируются практически в одних и тех же областях и имеют одинаковую температурную чувствительность. При наличии на входной щели участков с сильным полем (> 1 кГс), линия с большим фактором

Ланде должна давать меньшее измеренное поле по той причине, что соответствующие зеемановские σ -компоненты частично выходят за пределы выходных щелей магнитографа и уменьшают измеряемый сигнал, тогда как для линии с меньшим фактором Ланде этот эффект должен быть менее существенным. Теоретически, отношение измеренных по таким линиям полей должно меняться в зависимости от расположения $\Delta\lambda$ выходных щелей в крыльях обеих линий.

Используя данные в указанных линиях при трех размерах выходных щелей, Стенфло [9, 10] впервые выявил эффект «насыщения» сигнала магнитографа вне пятен, притом в сугубо спокойных областях на Солнце, где измеренные поля не превышали 50 Гс. Он показал, что в фотосферной сетке вне активных областей присутствуют магнитные элементы напряженностью 1.1–2.3 кГс — своеобразные маленькие «невидимые» пятна.

Позже метод «отношения линий» применялся другими исследователями как для спокойных [4, 6, 8, 11], так и активных областей, включая и вспышку [5]. Получены довольно однородные и непротиворечивые результаты, приводящие к одной и той же картине: в линиях FeI 5247.1 и 5250.2Å возникает расхождение измеренных напряженностей, которого не должно быть в приближении слабого поля, когда для обеих линий нет никакого существенного сдвига пиков параметра Стокса V относительно выходных щелей инструмента. В пользу достоверности результатов метода свидетельствуют также спектрально-поляризационные наблюдения вспышки [5], показавшие, что во время вспышки локальные магнитные поля, измеренные по методике «отношения линий», должны увеличиваться примерно на 500 Гс. Аналогичный эффект получен для другой вспышки и другим методом [7], основанным на сравнении расщеплений пиков параметра Стокса V в той же паре спектральных линий. С этой точки зрения, нет никаких оснований не доверять основному выводу работы Стенфло [9] и других аналогичных работ о том, что метод отношения линий на основе пары FeI 5247.1 и 5250.2 дает достоверную информацию о величине (или, по крайней мере, порядке величины) магнитного поля в тех «сверхтонких» структурах, которые пока что не разрешаются прямыми наблюдениями.

Иная точка зрения изложена в только что вышедшей из печати работе В.А.Котова [1]. Здесь представлены весьма обширные, важные и интересные данные об общем магнитном поле Солнца, измеренном в линиях FeI 5247.1 и 5250.2 за длительный период — с 2001 по 2011 г., т.е. почти 11-летний солнечный цикл. Рассмотрим эту работу более детально.

2. АНАЛИЗ РАБОТЫ В.А.КОТОВА [1]

В работе представлены измерения общего магнитного поля Солнца, выполненные на Крымском двухканальном магнитографе в параллельном (несфокусированном) пучке. При таких измерениях в измеряемый сигнал наибольший вклад вносит центральная зона Солнца в основном по трем причинам: 1) из-за большей яркости в континууме вблизи центра диска, 2) из-за того, что вблизи лимба поля в силовых трубках должны быть почти поперечными и не вносить вклад в круговую поляризацию, измеряемую на инструменте и 3) из-за вилсоновской депрессии в силовых трубках, приводящей к «закрыванию»

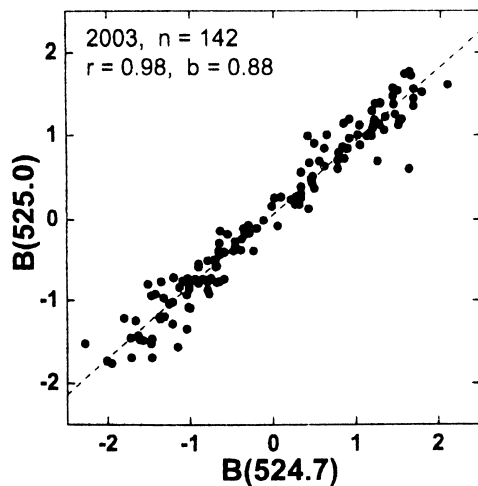


Рис. 1. Репродукция рис.1 из работы В.А.Котова [1], показывающего корреляционную диаграмму общего магнитного поля по измерениям в линиях FeI 5247.1 и 5250.2 за 2003 г. По оси абсцисс — магнитное поле (в Гс) по линии FeI 5247.1, по оси ординат — по линии 5250.2. Штриховая линия — прямая регрессии с наклоном $b = B(5250.2)/B(5247.1) = 0.88$.

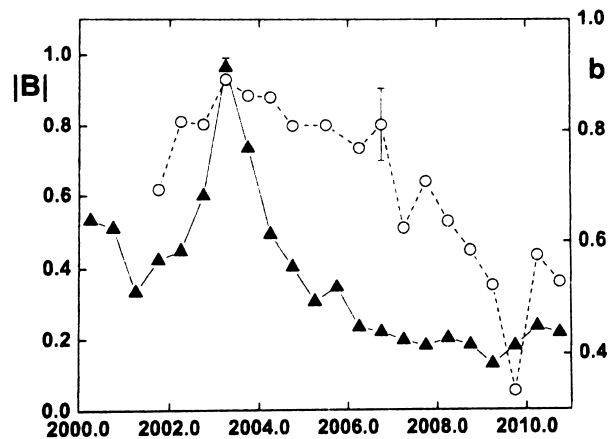


Рис. 2. Репродукция рис.3 из работы [1], показывающего изменение со временем параметра наклона b (кружки и штриховая линия, правая вертикальная ось), а также полугодовой средней напряженности $|B|$ в гауссах (треугольники и отрезки сплошной линии).

участков с сильными полями на больших гелиоцентрических углах.

Примечательно, что эти измерения также выявили достоверное различие измерений в линиях FeI 5247.1 и 5250.2 (рис. 1). Оказалось, что с 2001 по 2011 гг. параметр наклона b все время был меньше единицы (рис. 2), указывая, в рамках идеологии Я.О.Стенфло, на присутствие на Солнце значительного вклада неразрешимых магнитных полей с килогауссовой напряженностью.

Автор работы [1] называет такие возможные причины расхождений измеренных напряженностей по разным линиям: «(а) «виновато» само Солнце, с его сверхтонкой магнитной структурой, насыщением магнитографа в элементах сильного поля и расхождением силовых линий с высотой, или главное — (б) инструментальные причины и (в) шумы магнитографа, или дело — (г) в квантовой природе света (в частности, эффектах «нелокальности», «сцепления» и «слияния» фотонов, экспериментально доказанных в лабораториях; см., например, Белинский, 1997; Бувместер и др., 1997; Сантори и др., 2002; Алберт и Галчен, 2009) или (д) комбинация причин».

В.А.Котов [1] склоняется, в итоге, к интерпретации (г), а вариант (а) отклоняет по следующей причине: «На рис. 3 видим, что в 2003 г., т.е. после вершины цикла 23 по числу пятен, наблюдались максимумы как $|B|$, так и наклона b ; в целом b более или менее хорошо «отслеживает» поведение $|B|$ с циклом (коэффициент корреляции $r = 0.69$). В модели концентрированных магнитных жгутов естественно полагать, что максимум $|B|$ сопровождается ростом числа жгутов, их средней напряженности и плотности распределения в фотосфере. В такой модели наклон b должен *уменьшаться* с ростом $|B|$ из-за насыщения и температурной чувствительности 525.0. На деле же мы имеем противоположную картину: наклон b *увеличивается* с ростом $|B|$, т.е. с приближением к минимуму. Это противоречит модели».

Здесь необходимы некоторые пояснения. Теоретический расчет отношения $b = B(5250.2)/B(5247.1)$ показывает, что для средних частей профилей линий FeI 5247.1 и 5250.2 величина b действительно падает при росте магнитного поля в силовых трубках (см. рис. 3, заимствованный из работы [8], где параметр k по физическому смыслу аналогичен параметру b). На этом рисунке наиболее крутым участкам профилей линий FeI 5247.1 и 5250.2 соответствуют значения по оси абсцисс $0.04 - 0.05 \text{ \AA}$; именно здесь наиболее выгодно (в отношении величины сигнал/шум) устанавливать выходные щели магнитографа. Видно, что в этой части профилей параметр $k \leq 1$ и меняется следующим образом: от $k = 0.95$ (как в 2003 г. на рис. 2) до $k = 0.33$ (2009 г. на рис. 2). Первое значение соответствует $B \approx 500$ Гс, тогда как второе — $B \geq 2000$ Гс. То есть, действительно вероятны значительные изменения действительных («внутренних») напряженностей в силовых трубках, если только признать, что изменения b — солнечный эффект, не противоречащий какому-нибудь другому доказанному солнечному эффекту.

В отношении последнего, рассуждения автора статьи [1] о том, что (см. выше) «в модели концентрированных магнитных жгутов естественно полагать, что максимум $|B|$ сопровождается ростом числа жгутов, их средней напряженности и плотности распределения в фотосфере» можно рассматривать

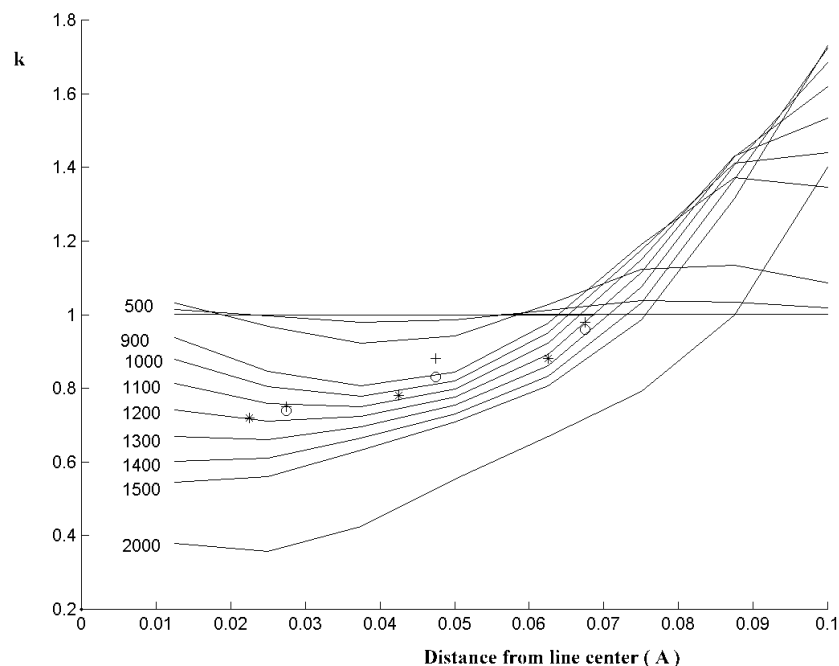


Рис. 3. Сопоставление наблюдаемых и теоретических зависимостей параметра $k \equiv b$ от расстояния от центра линии согласно данным работы [8]. Здесь \circ и $+$ — данные наблюдений на магнитографе КрАО в 1978 и 1991 гг., $*$ — наблюдения Стенфло (1973). Теоретические зависимости показаны тонкими линиями с указанием величины магнитного поля в Гс.

лишь как предположение, но не как твердо установленный факт (кстати, какая конкретно модель имеется ввиду, какого автора — не указано). Поэтому лучше обратиться к другим подобным и надежно установленным данным, позволяющим по аналогии сделать хотя бы предварительное заключение, действительно ли напряженности в тонких структурах и их поверхностная плотность (фактор заполнения) должны изменяться синхронно, т.е. в фазе.

Конечно, наиболее подробно исследованы на Солнце такие дискретные магнитные структуры, как солнечные пятна. Аналогом фактора заполнения здесь выступают числа Вольфа (лучше — общие площади пятен), а напряженностями — пиковые значения модуля напряженностей в центральной части больших пятен. Здесь тоже есть свои «мешающие» эффекты, в частности, зависимость «магнитное поле — диаметр пятна»: магнитное поле, в общем, тем больше, чем больше диаметр пятна и при изменении средних диаметров пятен с солнечным циклом возможны фиктивные вариации усредненных напряженностей, если брать для усреднения пятна всех диаметров. Именно поэтому автором работ [2, 3] при подсчете средних напряженностей в пятнах брались не все пятна, а лишь крупные пятна диаметром 22–44 Мм (30''–60''). Измерения в таких пятнах практически свободны от влияния как наклона силовых линий к лучу зрения (а потому меряется модуль магнитного поля, а не продольная компонента), так и рассеянного света и инструментальной поляризации.

Лоцицкой Н.И. [2,3] на основании анализа около 20 000 визуальных измерений магнитного поля в пятнах диаметра 22–44 Мм установлено, что средние напряженности в таких пятнах (индекс B_{sp}) меняются весьма своеобразно — совсем не так, как числа Вольфа. В среднем, максимальные напряженности в пятнах возникают не в максимуме 11-летнего цикла по числам Вольфа, а с опозданием относительно него на 2–4 года. Например, в 23-м цикле максимальные напряженности в пятнах были в 2003–2005 гг., а не в 2001 г., когда был максимум этого цикла по числам Вольфа.

Хотя этот существенно новый и весьма интересный результат не имеет пока удовлетворительного объяснения (поскольку получен совсем недавно), он остается надежно установленным и весьма важным эмпирическим обобщением, с которым следует считаться и от которого, прежде всего, следует отталкиваться в наших рассуждениях типа «что может быть, а чего не может быть» в сверхтонких силовых трубках. С этой точки зрения, более вероятно, что представленная выше на Рис. 2 вариация наблюдаемых значений параметра b отражает *реальные изменения напряженности магнитного поля в мелкомасштабных силовых трубках*. Очень интересно то, что тогда получается, что в 2003–2005 гг., когда напряженности в пятнах были максимальными, в мелкомасштабных силовых трубках — они, наоборот, были ближе к минимальным (около 1000 Гс согласно рис. 3).

Можно ли здесь говорить о том, что напряженности в пятнах и мелкомасштабных силовых трубках идут точно в противофазе, т.е. антикоррелируют? По-видимому, да. Действительно, Лоцицкой [2,3] показано, что резкое снижение индекса B_{sp} имело место в 2008–2009 гг. (до 2350 Гс, тогда как в 2005 г. этот индекс достигал почти 2700 Гс). А из работы В.А.Котова [1] следует (см. также выше рис. 2), что минимальные значения параметра b (т.е. максимальные напряженности в силовых трубках) были в конце 2009 г. Удивительное совпадение с точностью до менее чем 1 года, свидетельствующее о достоверности измерений общего магнитного поля на БСТ-1 КрАО, несмотря на то, что измеряемые величины поля совсем мизерны — десятые доли гаусса!

3. ВЫВОДЫ

Весьма вероятно, что действительные напряженности в предельно мелкомасштабных силовых трубках изменяются с 11-летним циклом солнечной активности следующим образом: максимальные значения поля в них примерно соответствуют минимуму чисел Вольфа, тогда как минимальные — примерно 2–4 году после максимума солнечного цикла. Из сопоставления с данными по пятнам [2, 3] следует вывод, что напряженности магнитного поля в крупных пятнах (22–44 Мм) и пространственно неразрешимых силовых трубках изменяются в противофазе с точностью до ≤ 1 года.

1. Котов В.А. Загадка измерений общего магнитного поля Солнца // Известия Крым. Астрофиз. Обсерватории. — 2012. — **108**, № 1. — С. 35–47.
2. Лоцицкая Н.И. Вековые вариации магнитных полей солнечных пятен: сопоставление различных индексов // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 4. — С. 30–36.
3. Лоцицкая Н.И., Малащук В.Ф., Степанян Н.Н. Начало 24-го цикла солнечной активности по данным измерений магнитных полей солнечных пятен // Известия Крым. астрофиз. обсерватории. — 2011. — **107**, № 1. — С. 244–245.
4. Лоцицкий В.Г., Цан Т.Т. Эмпирическая модель мелкомасштабного магнитного элемента спокойной области Солнца // Кинематика и физика небес. тел. — 1989. — **5**, № 1. — С. 50–58.
5. Лоцицкий В.Г., Цан Т.Т., Осика О.Б. Порівняльна діагностика тонкоструктурних магнітних полів у сонячному спалаху та спокійних областях на Сонці // Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Астрономія. — 2007. — Вип. 44. — С. 17–20.

6. Рачковский Д.Н., Цап Т.Т. Изучение магнитных полей методом отношения измеренных напряженностей в линиях вне активных областей // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 1985. — **71**. — P. 79–87.
7. Lozitska N., Lozitskij V. Small-scale magnetic fluxtube diagnostics in a solar flare // Solar Physics. — 1994. — **151**, № 2. — P. 319–331.
8. Rachkovsky D.N., Tsap T.T., Lozitsky V.G. Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods // Journ. of Astrophys. and Astronomy. — 2005. — **26**, № 4. — P. 435–445.
9. Stenflo J.O. Magnetic-field structure of the photospheric network // Solar Physics. — 1973. — **32**, № 1. — P. 41–63.
10. Stenflo J.O. Small-scale magnetic structures on the Sun // Astron. Astrophys. Rev. — 1989. — **1**. — P. 3–48.
11. Wiehr E. A unique magnetic field range for non-spot solar magnetic regions // Astron. and Astrophys. — 1978. — **69**, № 2. — P. 279–284.

Поступила в редакцию 27.09.2013