

ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ ПО ЛИНИЯМ ФОТОСФЕРЫ И ХРОМОСФЕРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Прямые измерения магнитных полей в солнечной хромосфере и короне, где выделяется значительная (если не основная) часть вспышечной энергии, являются очень важными и одновременно – трудными в методическом отношении. В этом диапазоне высот формируются в основном лишь широкие спектральные линии, наблюдаемая полуширина $\Delta\lambda_{1/2}$ которых значительно больше зеемановского расщепления $\Delta\lambda_H$ даже при полях в несколько килогаусс. Теоретически при $\Delta\lambda_H \ll \Delta\lambda_{1/2}$ и использовании анализатора круговой поляризации, измеряется (по относительному расщеплению “центров тяжести” боковых компонент зеемановского триплета) не величина модуля индукции B , а его продольная компонента $B_{\parallel} = B \cos \gamma$, где γ – угол между лучом зрения и силовой линией магнитного поля. Это обусловлено тем, что тогда каждая σ -компонента блендируется π -компонентой, образуя с ней общий профиль интенсивности, и смещение его “центра тяжести” относительно центра нерасщепленной линии будет меньше, чем $\Delta\lambda_H$. Если же мы имеем $\Delta\lambda_H \approx \Delta\lambda_{1/2}$, то измеренное значение магнитного поля будет по величине промежуточным между B_{\parallel} и B . Лишь при $\Delta\lambda_H \geq \Delta\lambda_{1/2}$ можно измерить величину, достаточно близкую к модулю поля B .

Дополнительные сложности возникают при пространственно неразрешимой структуре магнитного поля [5–7]. В таком случае наблюдаемая картина распределения интенсивности в спектре формируется как результат суммирования вкладов от участков с более слабыми “фоновыми” полями а также участков, соответствующих мелкомасштабным элементам с более сильными полями. В суммарной

* Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

картине распределения интенсивности в линии возникает некоторое промежуточное по величине расщепление I+V та I–V профилей, в которых практически никогда не видно полного разделения π - и σ -компонент. Формально, по внешнему виду I+V та I–V профилей, тогда имеем случай $\Delta\lambda_H \ll \Delta\lambda_{1/2}$, хотя фактически здесь могут присутствовать в замаскированном виде сильные магнитные расщепления, спектрально неразличимые из-за незначительного фактора заполнения площади апертуры мелкомасштабными элементами с высокой напряженностью.

Простой способ проверки того, действительно ли мы имеем достаточно слабые поля или же замаскированные сильные, состоит в следующем [7]. При действительно слабых магнитных полях, когда I+V та I–V профили расщеплены на незначительную величину (т.е. наблюдается $\Delta\lambda_H \ll \Delta\lambda_{1/2}$), бисекторы этих профилей должны быть параллельными друг другу как при продольном, так и непродольном поле. Первые признаки непараллельности бисекторов возникают при $\Delta\lambda_H \approx 0,5\Delta\lambda_{1/2}$ и непродольном поле, и по ним можно грубо оценить нижний предел действительных величин локальных полей. При дальнейшем увеличении $\Delta\lambda_H$ относительно $\Delta\lambda_{1/2}$, непараллельность бисекторов (при непродольном поле) все более нарастает, а исчезает лишь тогда, когда при (при $\Delta\lambda_H \geq \Delta\lambda_{1/2}$) зеемановские π - и σ -компоненты полностью разделяются спектрально. Если же магнитное поле является двухкомпонентным (фон + мелкомасштабные структуры с сильным полем), то непараллельность бисекторов может быть даже при продольном поле и наблюдаемых (в суммарном профиле) небольших магнитных расщеплениях.

Фактические значения напряженностей локальных полей можно тогда определить из модельных расчетов, подгоняя по многим точкам наблюдаемых профилей I+V и I–V теоретические значения относительных сдвигов бисекторов под наблюдаемые.

В настоящее время большая часть информации о магнитных полях в солнечных вспышках относится к фотосферному уровню (см. напр. [9,11]). Имеется также ограниченное число публикаций, в которых изложены результаты измерений магнитных полей во вспышках для зоны температурного минимума и хромосферы. В последнем случае часто не учитывается возможное присутствие мел-

комасштабной (пространственно неразрешимой) структуры магнитного поля [8], и поэтому остается неясным, какими были локальные напряженности в исследованных вспышках.

В настоящей работе сопоставлены результаты прямых измерений магнитного поля на уровнях фотосферы и хромосферы, и путем модельных расчетов найдены параметры двухкомпонентной структуры магнитного поля для хромосферного уровня.

МАТЕРИАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

Ниже исследуется солнечная вспышка 27 июля 2004 г. балла M1.2/1N, которая возникла в крупнейшей на тот день активной области, находящейся недалеко от западного лимба ($\mu = 0,61$). Вспышка наблюдалась на эшелном спектрографе горизонтального солнечного телескопа Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко [4]. Спектр одного и того же места вспышки снимался 4 раза в такие моменты: 05:53:00, 05:54:55, 05:59:00 и 06:02:45 UT. Снимки были сделаны на фотопластинки ORWO WP3 с экспозицией 20 сек.; указанные выше моменты относятся к началу каждой экспозиции. Пространственное разрешение наблюдений около 1 Мм, спектральное – 25 мÅ. Спектрограммы фотометрировались на микрофотометре МФ-4; результаты фотометрии обрабатывались на ЭВМ с целью получения профилей линий в остаточных интенсивностях и измерения по ним магнитных полей.

По визуальным измерениям магнитных полей, выполненным в линии FeI 5250,2Å в АО КНУ, индукция магнитного поля в двух крупнейших пятнах, хорошо видимых на *Рис. 1*, составляла 3400 Гс (для более близкого к центру рисунка, со вспышечной эмиссией в его ядре), и 3300 Гс (для правого на рисунке, без вспышечной эмиссии). Полярность магнитного поля в обоих пятнах была северной (N). В том месте активной области, на которую проектировалась входная щель спектрографа, измеренные магнитные поля составляли 500–800 Гс (табл. 1) и также имели N полярность.

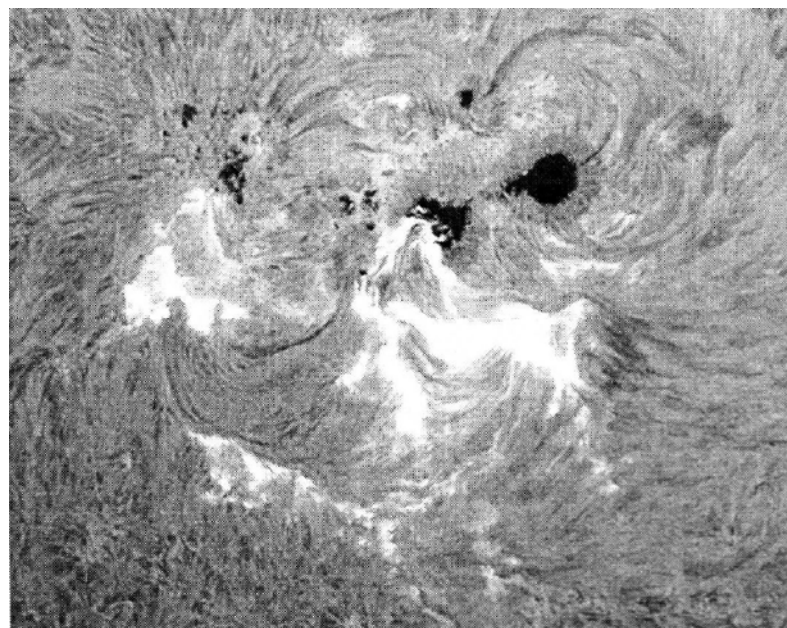


Рис. 1. Вспышка 27 июля 2004 г. по наблюдениям в линии H α согласно материалам, помещенным на сайте <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap040726.html>. Положение входной щели эшелного спектрографа соответствует геометрическому центру этого рисунка

Таблица 1
Спектральные линии, использованные для измерений магнитных полей

№ п/п	Элемент, Мультиплет	λ , Å	χ , эВ	h, км	g_{eff}
1	H-1(H β)	4861,332	10,15	200–1200*	1,05
2	NiI-113	4863,931	3,72	-	1,25
3	CrII-30	4864,32	3,84	-	1,03
4	VI-3	4864,741	0,02	205	0,91

Ниже приведены результаты, относящиеся к моменту 05:53 UT, наиболее близкого к максимуму вспышки. Измерения проводились

по четырем спектральным линиям (табл. 1), из которых одна линия (H_{β}) формируется в хромосфере, а остальные – в фотосфере.

В таблице приведены такие параметры: λ – длина волны линии, χ – потенциал возбуждения нижнего терма, h – высота формирования линии в невозмущенной фотосфере согласно монографии Гуртовенко и Костыка [2] и g_{eff} – эффективный фактор Ланде. Для линии H_{β} высота формирования не указана в работе [2]; разные источники (в т.ч. гарвард-смитсоновская модель атмосферы) дают различные оценки, в пределах от 1000–1200 км для ядра линии и до фотосферных значений в несколько сот километров – для ее крыльев.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ «ЦЕНТРОВ ТЯЖЕСТИ»

Сначала были измерены средние по каждому из профилей $I+V$ та $I-V$ зеemanовские расщепления, которые дают для однородного поля величину, близкую к продольному полю B_{\parallel} (табл. 2).

Таблица 2
Результаты измерений магнитных полей во вспышке и вне вспышке методом “центров тяжести”

Линия	B_{\parallel} (вспышка)	B_{\parallel} (вне вспышки)	ΔB_{\parallel}
$H_{\beta}4861,332$	1100	800	+300
$Ni4863,931$	800	800	0
$CrII4864,32$	500	400	+100
$VI4864,741$	900	1000	-100

Здесь представлены результаты измерений в наиболее ярком узле вспышки в пределах входной щели спектрографа, а также вне вспышки – в области слабовозмущенной фотосферы на расстоянии примерно 5 Мм от указанного места. Видно, что с учетом вероятных ошибок измерений (в среднем, ± 100 Гс), магнитное поле во вспышке получается максимальным по линии H_{β} .

Кроме того, если сравнивать место вспышки и соседний с ней участок активной области, разность $\Delta B_{\parallel} = B_{\parallel}(\text{вспышка}) - B_{\parallel}(\text{вне вспышки})$ достоверно отличается от нуля также для линии H_{β} . Таким образом, из этих простых измерений следует, что вспышка является

областью усиленного (а не ослабленного!) магнитного поля, притом это усиление наиболее заметно именно в хромосфере, а не фотосфере. Этот результат хорошо согласуется с выводами работ [5, 10], согласно которым в максимуме вспышек наблюдается резкий рост напряженности магнитного поля, с высотным его пиком вблизи зоны температурного минимума.

РАСЩЕПЛЕНИЕ БИСЕКТОРОВ В ПРОФИЛЯХ $I \pm V$

Анализ распределения расщепления бисекторов профилей $I \pm V$ с расстоянием от центра линии показало, что наиболее существенные отклонения от случая слабого однородного поля ($\Delta\lambda_{\text{H}} \ll \Delta\lambda_{1/2}$) наблюдается именно во вспышке (Рис. 2).

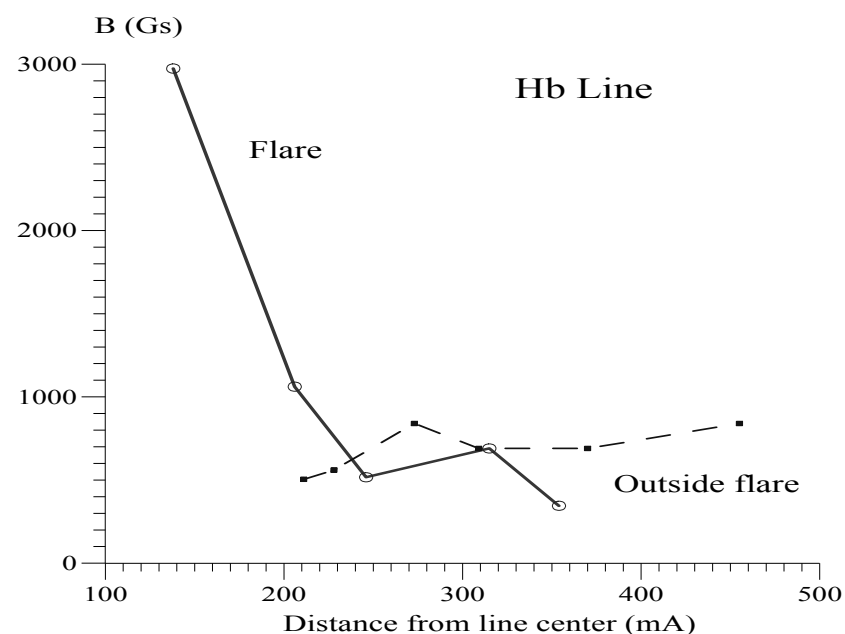


Рис. 2. Сопоставление расщепления бисекторов профилей $I \pm V$ в линии H_{β} для вспышки (сплошная линия) и места вне вспышки (штриховая линия)

Видно, что вне вспышки расщепление бисекторов является почти одинаковым на разных расстояниях от центра линии (что можно ожидать, напомним, при однородном поле), тогда как во вспышке наблюдается резкий рост расщепления при переходе от крыльев линии к ее ядру. Ввиду того, что этот эффект наблюдается при небольшом относительно ширины линии магнитном расщеплении ($\Delta\lambda_H \ll \Delta\lambda_{v_2}$), его нельзя связать с непродольностью магнитного поля. Альтернативой может быть существенная неоднородность магнитного поля, причем эта неоднородность, скорее всего, имеет комбинированный характер – она одновременно и высотная, и поверхностная. Как первое приближение, попытаемся смоделировать лишь поверхностную неоднородность магнитного поля, поскольку для расчетов высотной неоднородности, строго говоря, необходимо определить функцию источника линии H_β во вспышке, что является непростой и отдельной задачей.

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВО ВСПЫШКЕ

Предположим, магнитное поле во вспышке является чисто продольным и двухкомпонентным, состоящим из фонового поля с индукцией B_1 и мелкомасштабного с индукцией B_2 ($B_1 < B_2$). Отношение этих полей B_2 / B_1 обозначим через R . Пусть доля площади апертуры, занятая полем B_1 , есть S_1 , а полем B_2 – S_2 , причем $S_1 + S_2 = 1$. Фактор заполнения площади апертуры компонентой с сильным полем обозначим через A .

$$\frac{S_2}{S_1 + S_2} = A \quad (1)$$

Пусть, далее, l – произвольная длина волны в спектре, а l_0 – длина волны центра линии, а l_{H1} и l_{H2} – соответствующие магнитные расщепления (здесь для простоты написания формул переобозначено $l_H \equiv \Delta\lambda_H$).

Аппроксимируя профили зеемановских σ^+ и σ^- -компонент гауссианами, для распределения интенсивностей в наблюдаемых профилях I^\pm имеем

$$I^\pm = (1-A)\exp\{-(v \pm v_H)^2\} + A\exp\{-(1/k^2)(v \pm Rv_H)^2\}, \quad (2)$$

где

$$\frac{S_1}{S_1 + S_2} = 1 - A,$$

$$\frac{l - l_0}{\alpha} = v,$$

$$\frac{l - l_0}{\beta} = \frac{v}{k},$$

$$\frac{lH_1}{\alpha} = v_H \quad (3)$$

Здесь $\beta = k\alpha$, $\alpha / \beta = k$ – безразмерный коэффициент; параметры α и β являются характерными ширинами гауссиан, аппроксимирующих профили линий в фоновой и мелкомасштабной компонентах.

Чтобы получить профили, напоминающие по своим характеристикам наблюдаемые, названные выше параметры варьировались в довольно широких пределах, в частности, $v_H = 0 \div 2$, $A = 0 \div 1$, $k = 0 \div 1$, $R = 1 \div 15$.

Оказалось, что получить такой довольно простой (на первый взгляд) ход расщепления H_β во вспышке, как на *Рис. 2*, учитывая большое число свободных параметров (4), весьма непросто – можно лишь в довольно узком диапазоне этих параметров. В частности, удовлетворительное согласие наблюдений и расчетов (*Рис. 3*) было получено при таком наборе параметров: $v_H = 0,003 \div 0,004$; $A = 0,2 \div 0,3$; $k = 0,2 \div 0,25$; $R = 10 \div 12$.

Оптимальным, по-видимому, является набор $v_H = 0,004$, $A = 0,19$, $k = 0,21$, $R = 11$. Если перейти от относительных величин этих параметров к физическим характеристикам двухкомпонентного поля, то имеем следующую картину. На уровне формирования ядра линии H_β фоновое поле во вспышке составляло 400–500 Гс, и в это

поле были погружены с фактором заполнения $\approx 20\%$ мелкомасштабные элементы, в которых индукция магнитного поля была в 11 раз выше, чем в фоновом поле, т.е. составляла примерно 5500 Гс. Полуширины спектральных линий в мелкомасштабной компоненте были примерно в 5 раз уже, чем в фоновой компоненте, что соответствует температуре 8500 К в предположении, что величина турбулентной скорости равнялась нулю.

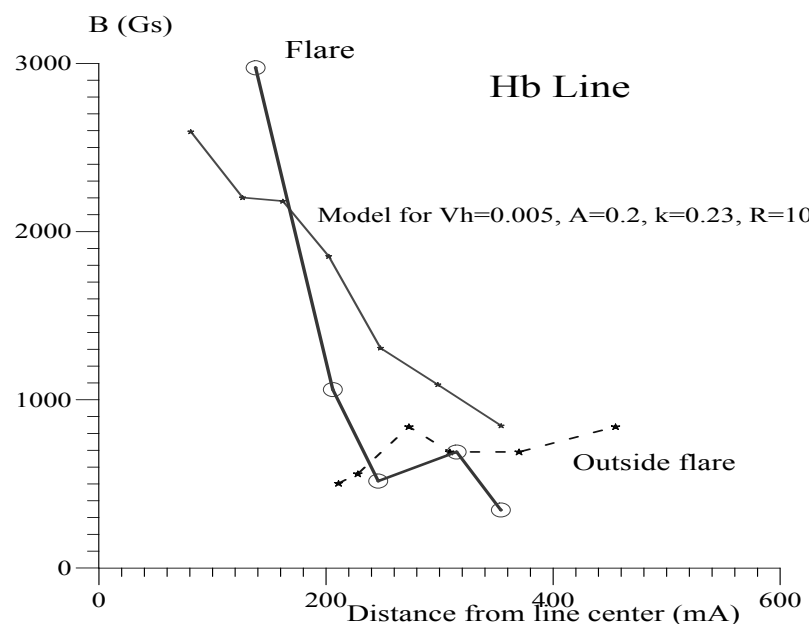


Рис. 3. Сопоставление наблюдений в линии H_{β} с модельными расчетами для двухкомпонентного магнитного поля

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектрофотометрическое исследование вспышки 27.07.2004. балла M1.2/1N показало, что магнитное поле в ней имело ряд особенностей, аналогичных найденным ранее в других вспышках:

1. Отмечено преобладание напряженности магнитного поля на более высоком уровне (хромосфера, линия H_{β}) по сравнению с более низким уровнем (фотосфера, линии NiI, CrII, VI). Более чем 30 лет назад Коваль и Степанян отмечали [3], что во время вспышек напряженность магнитного поля в ближайших ко вспышке пятнах больше в верхней фотосфере (линия CaI 6103), чем в средней фотосфере (линия FeI 6302,5). Они указывали, что без вспышек такого эффекта нет – поля по обеим линиям тогда примерно совпадают. Полученный нами результат отличается от данных работы Коваль и Степанян, во-первых, тем, что в нашем случае исследовалась область яркой вспышечной эмиссии вне солнечного пятна, и во-вторых, различие высот “хромосфера–фотосфера” у нас около 800–1000 км, тогда как в работе названных авторов это различие (для линий CaI 6103 и FeI 6302,5) гораздо меньше, примерно 100–200 км. Эти прямые измерения подтверждаются также данными синтеза наблюдаемых профилей во вспышке с помощью программы Барановского [10]: соответствующие полуэмпирические модели часто имеют острые высотные пики в области верхней фотосферы или зоны температурного минимума, т.е. именно в тех областях, где формируется ядро линии H_{β} . На существование сильных (килогауссового диапазона) магнитных полей в короне над активными областями указывают также данные, полученные радиоастрономическими методами [1].

2. В рамках двухкомпонентной модели магнитного поля вспышки мы приходим к картине, похожей на фотосферные двухкомпонентные модели [6]. В частности, для вспышки также приходится предполагать а) существенное различие (примерно в 10 раз) напряженностей в фоновой и мелкомасштабной компоненте и б) существенное сужение профилей (примерно в 5 раз) в мелкомасштабной компоненте, связанное, по-видимому, с подавлением турбулентности в сильных магнитных полях. Интересно также, что такой важный параметр, как отношение напряженности фонового поля B_i к фактору заполнения α , равен для вспышки $B_i / \alpha \approx 2,2$ кГс, тогда как для спокойных областей он равен $B_i / \alpha \approx 1$ кГс, т.е. эти отношения получаются одинаковыми с точностью выше чем пол-порядка. Это, по-видимому, свидетельствует о сохранении общих структурных

особенностей мелкомасштабных полей при переходе от фотосферы к хромосфере. В частности, здесь нет явных указаний в пользу того, что мелкомасштабное поле в хромосфере исчезает, образуя из расширившихся (с высотой) мелкомасштабных структур некое сплошное поле типа «магнитного покрывала».

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфрейх Г.Б. Наблюдения солнечных затмений в радиодиапазоне // «Физика Солнца и звезд», 3-й Международный научный семинар, Тезисы докл., 29 мая–2 июня 2006 г, Элиста, Калмыцкий гос. Университет. С.8–9.
2. Гуртовенко Э.А., Костык Р.И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов // Киев: Наук. думка, 1989. 200с.
3. Коваль А.Н., Степанян Н.Н. Изменения магнитных полей пятен на двух уровнях в связи с развитием активных областей // Солн. данные. 1972. № 1. С. 83–91.
4. Курочка Е.В., Курочка Л.Н., Лозицкий В.Г., Лозицкая Н.И., Остапенко В.А., Полупан П.Н., Романчук П.Р., Россада В.М. Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестник Киев. ун-та. Астрономия. 1980. Вып. 22. С.48–56.
5. Лозицкий В.Г. Сильні магнітні поля в маломасштабних структурах та спалахах на Сонці // Автореферат дис. доктора ф.-м. наук: 01.03.03. Київ, 2003. 28 с.
6. Лозицкий В.Г., Цап Т.Т. Эмпирическая модель мелкомасштабного магнитного элемента спокойной области Солнца // Кинематика и физика небес. тел. 1989. Т.5, № 1. С.50–58.
7. Цап Т.Т., Лозицкий В.Г., Шеминова В.А., Гладушина Н.О., Лейко У.М. Диагностика мелкомасштабных магнитных полей в солнечной атмосфере: основные методы, результаты и проблемы // Известия Крым. астрофиз. обсерватории. 1998. Т.94. С.170–172.
8. Abramenko V.I., Baranovsky E.A. Flare-related changes in the profiles of six photospheric spectral lines // Solar Physics. 2004. V.220, №1. P.81–91.
9. Kosovichev A.G., Zharkova V.V. Variations of photospheric magnetic field associated with flares and CMEs // Solar Phys. 1999. Vol.190, No.2. P. 459–466.
10. Lozitsky V.G., Baranovsky E.A., Lozitska N.I., Leiko U.M. Observations of magnetic field evolution in a solar flare // Solar Phys. 2000. Vol.191, № 1. P.171–183.
11. Zirin H., Tanaka K. Magnetic transient in flares // Astrophys. J. 1981. Vol. 250, No. 2. P. 791–795.

**В.Г.Лозицкий¹, Е.В.Курочка¹, О.Б.Осыка¹,
В.А.Шеминова², Г.А.Порфирьева³**

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СПОКОЙНЫХ И АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ НА СОЛНЦЕ

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью солнечных магнитных полей является их тонкая структура, обнаруженная впервые акад. Северным А.Б. [33, 34]. Об этом он писал в своей монографии [32] так: «В работе [33] мы предположили, что одновременное, удивительное появление обеих, временами широких, σ -компонент, а также π -компоненты магнитнорасщепленной линии в ядре пятен может быть связано с тонкой структурой магнитного поля пятен: возможно, что поле сосредоточено в отдельных трубках сечения, малого по сравнению с пятном, с различной напряженностью и, возможно, и полярностью».

Еще в конце 50-х годов XX ст. в КрАО было зарегистрировано появление в активных областях мелкомасштабных элементов с усиленным магнитным полем, которые проявлялись на регистрируемых как узкие «пички» или «складки», нарушающие плавный ход распределения напряженностей при сканировании активных обла-

¹ Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
Киев, Украина

² Главная астрономическая обсерватория
Национальной Академии Наук Украины,
Киев, Украина

³ Астрономический институт им. П.К.Штернберга,
Москва, Россия