

УДК 523.98

## Эффекты наклона магнитного поля в одиночных пятнах

*О.С. Гопасюк*

Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 7 июля 2003 г.

**Аннотация.** Создан метод, позволяющий исследовать структуру магнитного поля одиночных пятен по наблюдениям его лучевой составляющей. На основании 59 серий наблюдений 8 одиночных пятен установлено, что магнитная ось силовых линий одиночного пятна наклонена в среднем на  $8 - 10^\circ$  к западу и на  $1 - 5^\circ$  к северу. Величина угла наклона не зависит от гелиографической широты пятна. Определены углы раствора силовых линий магнитного поля пятна. Самые малые значения угла раствора в тени имеют пятна, находящиеся вблизи экватора. С переходом к большим широтам угол раствора силовых линий в тени пятна увеличивается. Наибольшее значение достигается в пятнах, расположенных на широтах  $15 - 25^\circ$  и затем несколько уменьшается для пятен, находящихся на широтах  $25 - 45^\circ$ . В полутени пятна величина угла раствора силовых линий не зависит от широты, на которой находятся пятна. Проведено обсуждение полученных результатов.

EFFECTS OF THE MAGNETIC FIELD INCLINATION IN A SIMPLE SUNSPOT, *by O.S. Gopasyuk*. The method of investigations of a magnetic field structure in simple sunspots on the bases measured its line-of-sight component was elaborated. The study of 59 observational series of the longitudinal magnetic field and brightness in 8 simple sunspots was carried out. It was found that the magnetic axis of the magnetic force lines of a simple sunspot is inclined on  $8 - 10^\circ$  to the west and on  $1 - 5^\circ$  to the north. The value of an angle of the inclination does not depend on the latitude on which a sunspot is situated. The beam angle of the magnetic field lines in the sunspot was determined. The sunspots located near the equator have the smallest values of beam angle in an umbra. The beam angle of the magnetic field lines in the sunspot umbra increases with the increasing longitude. The largest its value is reached in sunspots that are located on the latitudes  $15 - 25^\circ$  and decreases for the sunspots that are placed on the latitudes  $25 - 45^\circ$ . In a penumbra value of the beam angle does not depend from the longitude of a sunspot. Derived results are briefly discussed.

**Ключевые слова:** Солнце, пятна, магнитные поля

---

## 1 Введение

Одиночные пятна наиболее устойчивые образования, существуют два – три оборота, а некоторые из них и более пяти. Одиночные пятна с правильной формой тени и полутени имеют самую простую структуру магнитного поля. Структура их магнитного поля представляется в виде симметричного веера силовых линий, расходящихся с высотой. Ось веера, при этом, считалась ориентированной перпендикулярно к поверхности Солнца (Каулинг, 1959).

Более поздние исследования дали основание полагать, что ось веера силовых линий наклонена. По распределению вторичных полярностей, расположенных с разных сторон одиночного пятна, Бумба (1960) определил угол наклона магнитной оси к востоку на  $20^\circ$ . По положению одиночного пятна на диске Солнца в момент исчезновения движений Эвершеда Гопасюк (1966) получил угол наклоном магнитной оси пятна к востоку на  $7-8^\circ$ . По исследованию асимметрии эффекта Вилсона получен наклон оси симметрии пятна к востоку в среднем на  $15-30^\circ$  (Гайнуллина, Минасянц, 1981; Обашев и др., 1981). Однако анализ наблюдательных данных по магнитным полям в одиночных пятнах показывает, что это не совсем так.

Ниже мы исследовали структуру магнитного поля одиночных пятен по данным наблюдений продольной составляющей, которая несет в себе полную информацию о структуре вектора магнитного поля. В частности, данные наблюдений продольной составляющей позволяют определить наклон магнитной оси и угол расхождения силовых линий магнитного поля в одиночном пятне.

## 2 Наблюдения и обработка

Материал наблюдений был получен в 1978, 1999 и 2000 годах.

Продольные магнитные поля и яркости в одиночных пятнах были измерены одновременно в линии FeI 5253 Å. Линия FeI 5253 Å имеет простое магнитное расщепление с фактором Ланде  $g = 1.5$ . Ее эквивалентная ширина в центре солнечного диска составляет  $75 \text{ mÅ}$ . Потенциал возбуждения нижнего уровня этой линии равен  $3.28 \text{ эВ}$ . Она слабо чувствительна к температуре; в пятне несколько усиливается (Мур и др., 1966).

В 1978 г. наблюдения проводились на двойном магнитографе (Котов и др., 1982), а в 1999 и 2000 гг. – на быстродействующем цифровом магнитографе (Гопасюк, Залесов, 1996) Башенного солнечного телескопа Крымской астрофизической обсерватории.

Во все дни наблюдений входная щель спектрографа составляла  $1'' \times 2''$ .

Карты магнитного поля и яркостей были построены с сеткой  $2''37 \times 2''67$  (1978 г.) и  $2''22 \times 3''33$  (1999, 2000 гг.).

Пятна находились на разных расстояниях от центрального меридиана и экватора. Данные наблюдений были разбиты на три группы, в зависимости от широты пятна  $\varphi$ : 1)  $-15^\circ < \varphi \leq +15^\circ$ ; 2)  $+15^\circ < \varphi \leq +25^\circ$ ; 3)  $+25^\circ < \varphi \leq +45^\circ$ .

В табл. 1 представлено количество пятен и их записей в широтных интервалах.

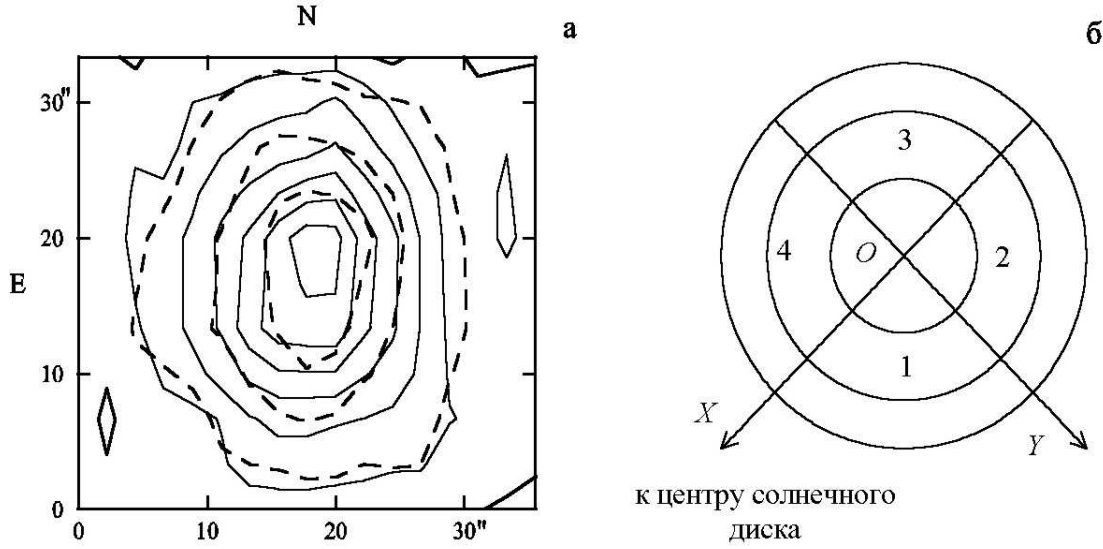
Таблица 1. Расположение количества пятен и их записей по широте

	1978		1999, 2000	
	записей	пятен	записей	пятен
$-15^\circ < \varphi \leq +15^\circ$	2	1	12	2
$+15^\circ < \varphi \leq +25^\circ$	10	1	8	2
$+25^\circ < \varphi \leq +45^\circ$	27	2	–	–

Общий ряд составил 59 серий наблюдений 8 одиночных пятен.

Распределение магнитного поля в одиночных пятнах наиболее близко соответствует случаю осевой симметрии. На рис. 1а представлен фрагмент карты продольного магнитного поля в одиночном пятне.

Для детального анализа структуры магнитного поля использовались регистрации яркости  $I$ , выраженные в единицах средней яркости соседнего невозмущенного фона. По каждой карте яркости в пятне были выделены три зоны: 1)  $0 < I \leq 0.5$ ; 2)  $0.5 < I \leq 0.7$ ; 3)  $0.7 < I \leq 0.9$ . Первые две зоны относятся к тени пятна, третья – к полутени. По ним определены средние положения центра пятна, введена новая система координат, начало которой совмещено с центром пятна и положительной осью  $OX$ , направленной на центр солнечного диска. Ось  $OZ$  направлена вертикально вверх. Оси



**Рис. 1.** (а) – Карта продольного магнитного поля, измеренного в линии FeI 5253 Å в одиночном пятне 20.08.00 ( $L \approx 7^\circ$ ;  $\varphi \approx 13^\circ$ ). Области поля S-полярности выделены сплошными линиями. Сплошные жирные линии разделяют области противоположных полярностей. Изолинии проведены через  $-200$ ;  $-500$ ;  $-1000$ ;  $-1500$ ;  $-2000$ ;  $-2500$  Гс. Жирными штриховыми линиями нанесены границы зон по яркости  $-0.5$ ;  $0.7$ ;  $0.9$ . (б) – Схематическое представление трех зон пятна, выделенных по яркости (концентрические окружности) и их разделение на квадранты. Цифрами обозначены номера квадрантов. Положительное направление осей показано стрелками

$OX$  и  $OY$  новой системы координат разделили каждую из зон пятна, выделенных по яркости, на четыре квадранта так, что 1-й и 4-й квадранты располагались со стороны центра солнечного диска, а 2-й и 3-й квадранты – со стороны лимба (рис. 1б).

Границы каждой из зон, выделенных по яркости, вместе с новой системой координат были перенесены с карт яркости на карты одновременно измеренного магнитного поля. Для каждой зоны ( $i = 1; 2; 3$ ) каждого пятна были вычислены напряженности продольного магнитного поля средние по площади первого и четвертого квадрантов и соответственно средние по площади второго и третьего квадрантов. Были также вычислены для каждого пятна каждой зоны средние по площади всех четырех квадрантов продольные составляющие поля. Для каждой широтной группы пятен были построены от  $tg\theta$  ( $\theta$  – гелиоцентрический угол центра пятна) зависимости

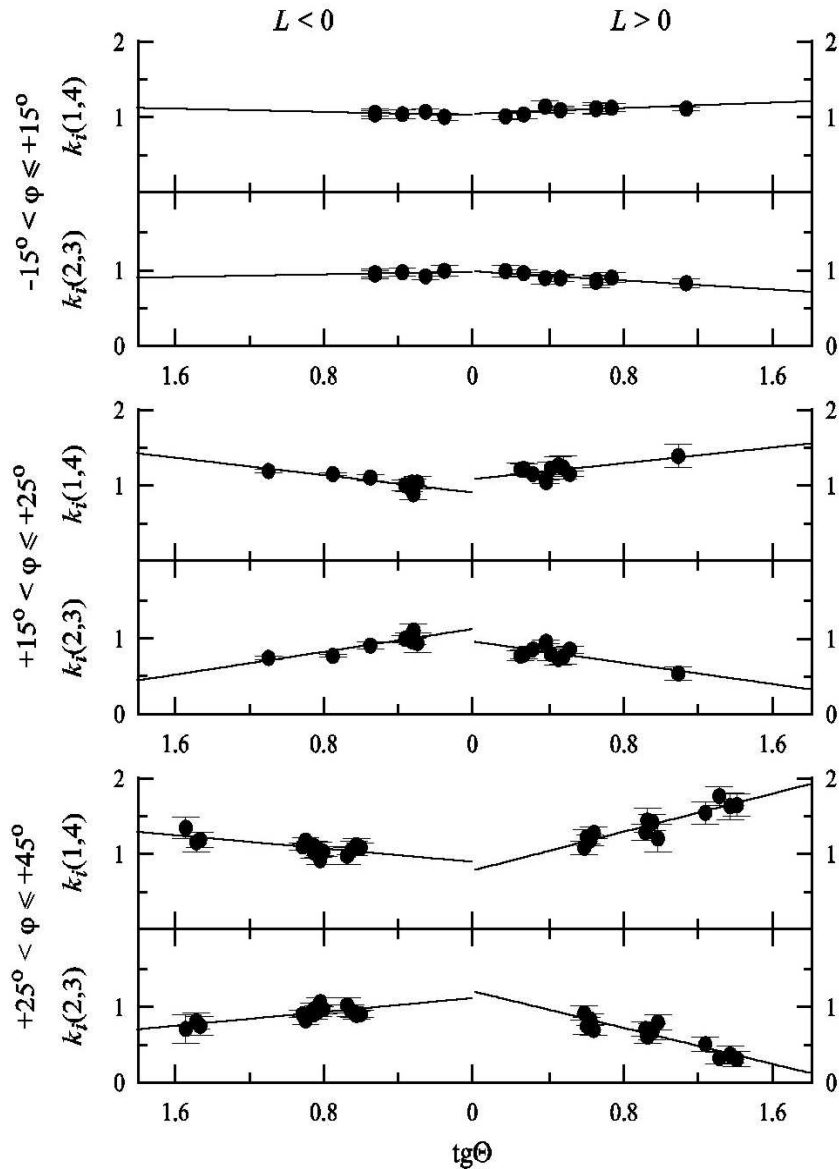
$$k_i(1, 4) = \frac{\bar{H}_{\parallel i}(1, 4)}{\bar{H}_{\parallel i}(1, 4 + 2, 3)} \quad (1)$$

и

$$k_i(2, 3) = \frac{\bar{H}_{\parallel i}(2, 3)}{\bar{H}_{\parallel i}(1, 4 + 2, 3)} \quad (2)$$

для пятен в восточном ( $L < 0$ ) и отдельно для пятен в западном ( $L > 0$ ) полушариях Солнца. Через данные наблюдений методом наименьших квадратов проводились прямые:  $k_i = A_i tg\theta + B_i$  (рис. 2). Измерения магнитного поля в пятнах и в 1978 г., и в 1999, 2000 гг. относятся к фазе роста солнечных циклов. Размеры пятен существенно не отличались. Построенные для каждого года наблюдений зависимости  $k_i(1, 4)$  и  $k_i(2, 3)$  от  $tg\theta$  показали один и тот же ход. Это дало возможность объединить данные наблюдений в разные циклы солнечной активности.

На рис. 2 приведены зависимости  $k_i(1, 4)$  и  $k_i(2, 3)$  от  $tg\theta$  для центральной зоны пятна ( $0 < I \leq 0.5$ ).



**Рис. 2.** Изменение от центра к краю солнечного диска средних по площади зоны напряженностей продольного магнитного поля в половине пятна со стороны лимба (квадранты 2, 3) и со стороны центра солнечного диска (квадранты 1, 4). За единицу взяты соответствующие им значения средних по площади зоны напряженностей магнитного поля (квадранты 1, 2, 3, 4). Прямые линии проведены методом наименьших квадратов. Показана величина вероятной ошибки. Для пятен в восточном полушарии  $L < 0$ , для пятен в западном полушарии  $L > 0$ . Каждая группа пятен, выделенная по широте  $\varphi$ , представлена своей зависимостью

### 3 Определение угла наклона магнитной оси

Анализ зависимостей  $k_i(1, 4)$  и  $k_i(2, 3)$  от  $tg\Theta$  дал основание сделать следующие выводы. Во-первых, поскольку квадранты 1, 4 и соответственно 2, 3 меняются местами при перемещении пятна из восточного полушария в западное, а ход зависимостей связан только с положением квадрантов относительно луча зрения, то распределение силовых линий магнитного поля одиночного пятна соответ-

ствует осевой симметрии. Во-вторых, независимо от зоны в пятне и гелиошироты, на которой находились пятна, по продольной составляющей магнитного поля четко выявляется восточно-западная асимметрия. Для пятен в западном полушарии значения  $k_i(1, 4)$  и  $k_i(2, 3)$  меняются сильнее с изменением  $tg\theta$ . Это различие увеличивается с переходом пятна к лимбу. Оно связано с разным наклоном силовых линий магнитного поля к лучу зрения в части пятна, расположенной со стороны лимба, и в части пятна, расположенной со стороны центра солнечного диска. Следовательно, асимметрия связана только с наклоном магнитной оси пятна к нормали к поверхности Солнца.

Наличие асимметрии (наклона магнитной оси пятна) требует учета отклонения оси пятна от нормали к поверхности Солнца.

Учет наклона был проведен методом преобразования векторов при повороте одной системы координат относительно другой (Гопасюк, 1977).

После усреднения по площади квадрантов продольного поля, выраженного через составляющие вектора в цилиндрических координатах, мы получили следующие выражения (Гопасюк, 2003)

$$k_i(1, 4) = \frac{\bar{H}_{\parallel i}(1, 4)}{\bar{H}_{\parallel i}(1, 4 + 2, 3)} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\bar{H}_r}{\bar{H}_z} \frac{tg\gamma}{\cos\alpha} - \frac{2}{\pi} \frac{\bar{H}_f}{\bar{H}_z} tg\alpha, \quad (3)$$

$$k_i(2, 3) = \frac{\bar{H}_{\parallel i}(2, 3)}{\bar{H}_{\parallel i}(1, 4 + 2, 3)} = 1 - \frac{2}{\pi} \frac{\bar{H}_r}{\bar{H}_z} \frac{tg\gamma}{\cos\alpha} + \frac{2}{\pi} \frac{\bar{H}_f}{\bar{H}_z} tg\alpha, \quad (4)$$

где  $\gamma = \theta - \beta$ . Угол  $\beta$  - угол наклона оси пятна в плоскости, совпадающей с лучом зрения (с осью  $OX$ ) и проходящей через центр Солнца.  $\bar{H}_r$ ,  $\bar{H}_z$  - средние по площади квадрантов радиальная и вертикальная составляющие вектора поля.

Выражения (3) и (4) хорошо описывают данные наблюдений, представленные на рис. 2.

Зная  $k_i(2, 3)$  и  $k_i(1, 4)$  при одних и тех же  $\theta$  для восточного ( $E$ ) и западного ( $W$ ) полушарий, на основании выражений (3) и (4) устанавливалась связь между значениями углов  $\gamma$  для восточного и западного полушарий.

Определение углов  $\gamma_{iW}$  и  $\gamma_{iE}$  проводилось на основании выражения (Гопасюк, 2003)

$$tg\gamma_{iW} = tg\gamma_{iE} \frac{k_{iW}(1, 4) - k_{iW}(2, 3)}{k_{iE}(1, 4) - k_{iE}(2, 3)} \quad (5)$$

и данных рис. 2.

Значения  $k_{iE}(1, 4)$ ,  $k_{iE}(2, 3)$  и  $k_{iW}(1, 4)$ ,  $k_{iW}(2, 3)$  брались при одинаковых значениях  $tg\theta$  для восточного и западного полушарий.

$\gamma_{iW}$  и  $\gamma_{iE}$  дают угол наклона магнитной оси пятна в плоскости луча зрения. По данным каждого массива находилось среднее значение угла  $\beta_i$  в каждой яркостной зоне пятна.

$$\beta_i = \frac{\gamma_{iW} - \gamma_{iE}}{2}, \quad (6)$$

где  $\gamma_{iE} = \theta - \beta_i$  и  $\gamma_{iW} = \theta + \beta_i$ .

Значения  $\beta_i$  для каждой из трех зон внутри пятна, принадлежащие одной широтной группе пятен, мало различались между собой. Результаты вычислений среднего по всем трем зонам яркости угла наклона магнитной оси  $\beta$  ( $0 < I \leq 0.9$ ) для каждой группы пятен, выделенной по широте, представлены в табл. 2. Положительные значения угла  $\beta$  означают, что магнитная ось пятна наклонена к западу.

Углы наклона магнитной оси пятна по долготе  $\Delta L$  и широте  $\Delta\varphi$  были определены по выражениям (Гопасюк, 2003)

$$tg\Delta L = tg\beta \cdot \cos\omega, \quad (7)$$

$$tg\Delta\varphi = -tg\beta \cdot \sin\omega, \quad (8)$$

где  $\omega = 90^\circ - D$ ,  $\sin D = \cos B_o \sin L / \sin \theta$ ,  $\varphi$  и  $L$  - гелиографические широта и долгота центра пятна,  $B_o$  - гелиоширота центра солнечного диска.

Таблица 2. Результаты вычислений

	$-15^\circ < \varphi \leq +15^\circ$	$15^\circ < \varphi \leq 25^\circ$	$25^\circ < \varphi \leq 45^\circ$
$0 < I \leq 0.5 \quad \Omega,^\circ$	10	24	19
$0.5 < I \leq 0.7 \quad \Omega,^\circ$	28	35	34
$0.7 < I \leq 0.9 \quad \Omega,^\circ$	51	50	51
$\beta,^\circ$	9	8	11
$0.7 < I \leq 0.9 \quad \Delta\varphi,^\circ$	-1	-2	-5
$\Delta L,^\circ$	9	8	10

Результаты вычислений этих углов для каждой группы пятен приведены в табл. 2. Положительные значения  $\Delta L$  означают, что магнитная ось пятна наклонена к западу, а отрицательные значения  $\Delta\varphi$  – наклон магнитной оси к северу.

Данные табл. 2 показывают, что магнитная ось пятна наклонена в среднем на  $8 - 10^\circ$  к западу и на  $1 - 5^\circ$  к северу. Величина угла наклона в пределах точности наших вычислений не зависит от гелиографической широты пятна. Выделим две причины, которые могут приводить к такому наклону оси магнитного поля пятна. Первая – в подфотосферных слоях, где проходит магнитная петля, образующая пятна на поверхности Солнца, плазма вращается медленнее, чем в фотосфере. На уменьшение скорости вращения подфотосферных слоев Солнца с глубиной в пределах конвективной зоны указывают исследования крутильных колебаний пятен (Гопасюк и др., 1988) и исследования по гелиосейсмологии (Косовичев и др., 1997). Вторая – магнитная петля вышедшая на поверхность Солнца и образующая пятно, расширяется и создает наклон лидирующей части петли к западу, а хвостовой – к востоку. В активной области одиночное пятно соответствует, как правило, лидирующей, западной, части петли.

#### 4 Определение угла раствора силовых линий

На основании выражений (3), (4) и данных вычислений  $\beta_i$  определены отношения  $\bar{H}_r/\bar{H}_z$ , которые соответствуют углу раствора силовых линий магнитного жгута в каждой из зон пятна ( $\bar{H}_r/\bar{H}_z = tg\Omega$ ,  $\Omega$  – угол раствора силовых линий):

$$\frac{\bar{H}_r}{\bar{H}_z} = tg\Omega = \frac{\pi}{4} \frac{k_{iE}(1,4) - k_{iE}(2,3) + k_{iW}(1,4) - k_{iW}(2,3)}{tg(\Theta - \beta_i) + tg(\Theta + \beta_i)}. \quad (9)$$

Средние величины угол раствора силовых линий  $\Omega$ , вычисленные по (9) для каждой яркостной зоны в каждой широтной группе, приведены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что угол раствора силовых линий в пятне увеличивается с переходом от центра пятна к его периферии независимо от широты, на которой находится пятно. Самые малые значения угла раствора в тени (первая и вторая зоны) имеют пятна, находящиеся вблизи экватора. С переходом к большим широтам угол раствора силовых линий в тени пятна увеличивается. Наибольшее значение  $\Omega$  достигается в пятнах, расположенных на широтах  $15 - 25^\circ$  и затем несколько уменьшается для пятен, находящихся на широтах  $25 - 45^\circ$ . Такая тенденция особенно четко выявляется для центральной зоны тени пятна ( $0 < I \leq 0.5$ ). Это может указывать на то, что в фотосфере равновесие магнитного поля пятен определяется не только разностью давлений плазмы внутри и вне магнитного жгута, но и натяжением азимутальной составляющей его поля. В таком случае, наибольший раствор силовых линий означает, что азимутальная составляющая магнитного поля в тени пятен на широтах  $15 - 25^\circ$  меньше, чем на других широтах ( $-15 - +15^\circ$  и  $25 - 45^\circ$ ). И как следствие этого, веер силовых линий магнитного поля расходится сильнее. Не исключено, что давление плазмы в тени пятен на широтах  $15 - 25^\circ$  выше, вследствие чего веер магнитного поля расходится сильнее. В полутени пятна, где магнитное поле преимущественно горизонтальное, величина угла раствора силовых линий не зависит от широты, на которой находятся пятна.

## 5 Заключение

Создан метод, позволяющий исследовать структуру магнитного поля одиночных пятен по наблюдениям его лучевой составляющей. В отличие от предыдущих исследований (Бумба, 1960, Гайнуллина, Минасянц, 1981, Гопасюк, 1966, Обашев и др., 1981), нами на основании изучения 59 серий наблюдений 8 одиночных пятен установлено, что магнитная ось силовых линий одиночного пятна наклонена в среднем на  $8 - 10^\circ$  к западу и на  $1 - 5^\circ$  к северу. Наклон к западу магнитной оси подтверждается сменой знака продольного поля у пятен. Наклон к западу – это наклон в направлении движения магнитных структур вследствие вращения Солнца. Величина угла наклона в пределах точности наших вычислений не зависит от гелиографической широты пятна.

Выделены две причины, которые могут приводить к наклону оси магнитного поля пятна на запад. 1) В подфотосферных слоях, где проходит магнитная петля, образующая пятна на поверхности Солнца, плазма вращается медленнее, чем в фотосфере. На уменьшение скорости вращения подфотосферных слоев Солнца с глубиной в пределах конвективной зоны указывают исследования крутильных колебаний пятен (Гопасюк и др., 1988) и исследования по гелиосейсмологии (Косовичев и др., 1997). 2) Магнитная петля, вышедшая на поверхность Солнца и образующая пятно, расширяется и создает наклон лидирующей части петли к западу, а хвостовой – к востоку. В активной области одиночное пятно соответствует, как правило, лидирующей, западной, части петли.

Определены отношения радиальной составляющей  $\bar{H}_r$  вдоль радиуса сечения магнитной трубки, образующей пятно, к составляющей вдоль магнитной оси пятна  $\bar{H}_z$  ( $\bar{H}_r/\bar{H}_z = \operatorname{tg}\Omega$ ), которые соответствуют углу раствора силовых линий магнитного поля пятна. Угол раствора силовых линий в пятне увеличивается с переходом от центра пятна к его периферии независимо от широты, на которой находится пятно. Самые малые значения угла раствора в тени (первая и вторая зоны) имеют пятна, находящиеся вблизи экватора. С переходом к большим широтам угол раствора силовых линий в тени пятна увеличивается. Наибольшее значение  $\Omega$  достигается в пятнах, расположенных на широтах  $15 - 25^\circ$  и затем несколько уменьшается для пятен, находящихся на широтах  $25 - 45^\circ$ . Такая тенденция особенно четко выявляется для центральной зоны тени пятна ( $0 < I \leq 0.5$ ). Если это так, то это может указывать на то, что в фотосфере равновесие магнитного поля пятен определяется не только разностью давлений плазмы внутри и вне магнитного жгута, но и натяжением азимутальной составляющей его поля. Наибольший раствор силовых линий обусловлен тем, что азимутальная составляющая магнитного поля в тени пятен на широтах  $15 - 25^\circ$  меньше, чем на широтах  $-15 - +15^\circ$  и  $25 - 45^\circ$ . И как следствие этого, веер силовых линий магнитного поля расходит сильнее. Не исключено, что давление плазмы в тени пятен на широтах  $15 - 25^\circ$  выше. Это тоже приводит к большему расширению магнитного веера. В полутени пятна, где магнитное поле преимущественно горизонтальное, величина угла раствора силовых линий не зависит от широты, на которой находятся пятна.

## Литература

- Бумба В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1960. Т. 23. С. 253.  
 Гайнуллина Р.Х., Минасянц Т.М. // Астрон. циркуляр. 1981. N. 1150. С. 5.  
 Гопасюк О.С. // Кинематика и физика небес. тел. 2003. Т. 19. N. 2. С. 126.  
 Гопасюк С.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1966. Т. 35. С. 139.  
 Гопасюк С.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1977. Т. 57. С. 107.  
 Гопасюк С.И., Залесов И.П. // Кинематика и физика небес. тел. 1996. Т. 12. N. 5. С. 48.  
 Гопасюк С.И., Лямова Г.В., Ханейчук В.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1988. Т. 79. С. 34.  
 Мур (Moore Ch.E., Minnaert M.G.J., Houtgast J). The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. Washington, 1966.  
 Каулинг Т. Магнитная гидродинамика. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.  
 Косовичев (Kosovichev A.G., Schou J., Scherrer P.H. et al.) // Solar Phys. 1997. V. 170. N. 1. P. 43.  
 Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1982. Т. 65. С. 3.

Обашев С., Гайнуллина Р.Х., Минасянц Т.М., Минасянц Г.С. // Вестник АН Каз.ССР. 1981. N. 3.  
С. 36.