

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН НА ФАЗЕ РОСТА 24 ЦИКЛА АКТИВНОСТИ

О.С.ГОПАСЮК

Поступила 8 июня 2016

Принята к печати 14 декабря 2016

Исследование структуры магнитного поля одиночных пятен на фазе роста 24 цикла активности было проведено на основании многочасовых серий магнитограмм продольного поля и изображений в континууме, полученных на Solar Dynamics Observatory (SDO) с инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI). Выявлено, что магнитная ось силовых линий магнитного поля пятен была наклонена к западу. Угол наклона оси в среднем составил $1-4^\circ$, его величина не зависит от гелиографической широты, на которой находится пятно.

Ключевые слова: *Солнце: магнитные поля пятен*

1. *Введение.* Одиночные пятна наиболее устойчивые образования, они менее всего подвержены влиянию окружающих их магнитных структур и существуют несколько оборотов. Одиночные пятна с правильной формой тени и полутени имеют самую простую структуру магнитного поля. Представление структуры магнитного поля в виде симметричного веера силовых линий, расходящихся с высотой, было предложено Каулингом [1]. При этом ось веера ориентирована перпендикулярно поверхности Солнца.

Дальнейшие исследования структуры магнитного поля одиночных пятен дали основание полагать, что ось веера силовых линий поля наклонена. В работе [2] по распределению вторичных полярностей, окружающих одиночное пятно с разных сторон, был определен угол наклона магнитной оси к востоку на 20° . Гопасюк [3] получил наклон магнитной оси пятна по положению одиночного пятна на диске Солнца в момент исчезновения движений Эвершеда. Величина наклона составила $7-8^\circ$ к востоку. По результатам исследований асимметрии эффекта Вилсона наклон оси симметрии пятна к востоку в среднем составил $15-30^\circ$ [4,5]. Однако анализ наблюдательных данных, выполненный в [6] по магнитным полям одиночных пятен, показал, что магнитная ось силовых линий пятна наклонена к западу на $8-10^\circ$.

В течение нескольких лет (2007-2009гг.) Солнце прошло необычную фазу своей активности - длительный минимум с чрезвычайно низким уровнем активности. Сравнение крутильных колебаний 23 и 24 циклов активности, проведенное в [7], позволило установить, что внутреннее вращение Солнца

на высоких широтах в 24 цикле замедлилось по сравнению с предыдущим циклом. Напряженность магнитного поля солнечных пятен постоянно уменьшалась с начала предыдущего цикла [8]. Эти и многие другие наблюдения демонстрируют, что 24-й цикл является необычным циклом. Это явилось мотивацией наших исследований структуры магнитного поля одиночных пятен, проходивших по диску Солнца в самом начале фазы роста 24-го цикла в 2010-2011гг. Исследования проведены по данным наблюдений продольного магнитного поля, полученным на HMI/SDO. Продольная составляющая магнитного поля несет в себе информацию о структуре вектора магнитного поля. В том числе, и о среднем наклоне магнитной оси симметричных пятен.

2. *Данные наблюдений и метод исследования.* Мы использовали наблюдения с высоким временным и пространственным (0.5 пиксел^{-1}) разрешением, полученные на инструменте Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) [9,10], установленном на борту Solar Dynamics Observatory (SDO) [11]. HMI позволяет получать карты продольного магнитного поля и интенсивностей в континууме каждые 45 и 720с. Нами были отобраны долговременные серии наблюдений 8 одиночных пятен, проходивших по диску Солнца с июня 2010г. по январь 2011г. (табл. 1). Временное разрешение отобранных данных 720с. Пятна находились на разных расстояниях от центрального меридиана и экватора. Данные о гелиографической широте ϕ и долготе L пятен представлены в табл.1.

Таблица 1

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

NOAA	Дата и время наблюдений	$L, ^\circ$	$\phi, ^\circ$
11084	00:00 UT 29.06.2010 - 23:48 UT 04.07.2010	E44 - W33	S19
11092	00:00 UT 31.07.2010 - 23:48 UT 06.08.2010	E46 - W46	N13
11093	00:00 UT 07.08.2010 - 23:48 UT 10.08.2010	E41 - W12	N10
11101	00:00 UT 27.08.2010 - 23:48 UT 01.09.2010	E47 - W31	N13
11115	00:00 UT 17.10.2010 - 23:48 UT 23.10.2010	E50 - W38	S29
11133	00:00 UT 07.12.2010 - 23:48 UT 12.12.2010	E45 - W34	N14
11140	00:00 UT 03.01.2011 - 23:48 UT 08.01.2011	E39 - W35	N31
11147	00:00 UT 19.01.2011 - 23:48 UT 23.01.2011	E31 - W23	N24

В зависимости от широты пятна φ , данные наблюдений были распределены на три группы: 1) $-15^\circ \leq \varphi \leq 15^\circ$; 2) $15^\circ < |\varphi| \leq 25^\circ$; 3) $25^\circ < |\varphi| \leq 45^\circ$.

Таким образом, в первую группу вошло 4 пятна (NOAA 11092, NOAA 11093, NOAA 11101, NOAA 11133), во вторую - 2 (NOAA 11084, NOAA 11147) и в третью - 2 (NOAA 11115, NOAA 11140).

Распределение магнитного поля в одиночных пятнах наиболее близко соответствует случаю осевой симметрии. На рис.1, в качестве примера, приведены изображение активной области NOAA 11192 в континууме и карта продольного магнитного поля, полученные на HMI/SDO 23:00 UT 3.08.2010. Использование одновременных записей активных областей в континууме позволяет провести детальный анализ структуры магнитного поля в пятнах. Данные в континууме I были приведены к соседней невозмущенной фотосфере. В каждый момент времени выделялись границы тени ($I \leq 0.7$) и полутени ($0.7 < I \leq 0.9$), по которым определялось среднее положение центра пятна. Вводилась система координат [12], начало которой было совмещено с центром пятна и положительной осью OX , направленной на центр солнечного диска (рис.1). Ось OZ - направлена вертикально вверх. Оси OX и OY новой системы координат разделили пятно (тень и полутень) на четыре квадранта, так, что 1-й и 4-й квадранты располагались со стороны центра солнечного диска, а 2-й и 3-й - со стороны лимба.

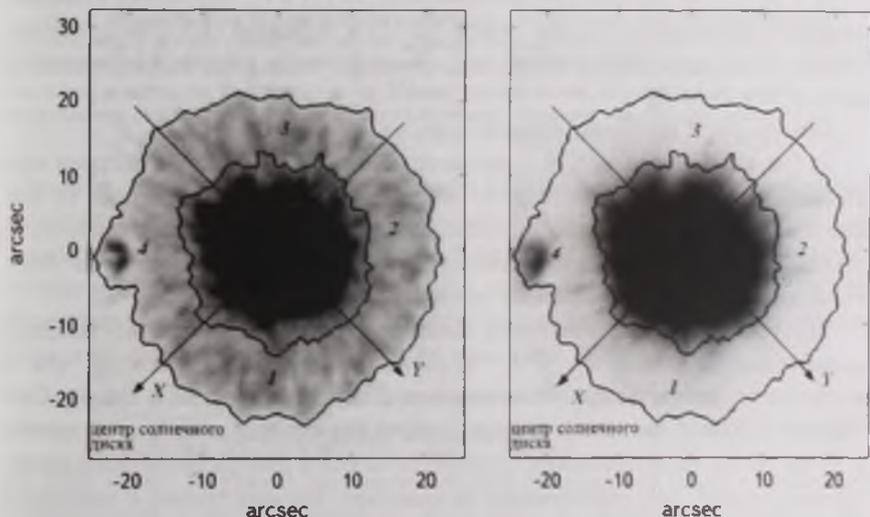


Рис.1. Изображение в континууме (левая панель) и карта продольного магнитного поля (правая панель) активной области NOAA 11092, полученной на HMI/SDO 23:00 UT 3.08.2010. Сплошные линии - границы тени ($I \leq 0.7$) и полутени ($0.7 < I \leq 0.9$) пятна. Показана система координат, начало которой O , совмещено с центром пятна. Цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены номера квадрантов.

Отдельно для тени и полутени каждого пятна, за время его прохождения по диску Солнца, были вычислены средние по площади первого и четвертого квадрантов напряженности магнитного поля $\overline{H}_{||1,4}$, средние по площади второго и третьего квадрантов напряженности магнитного поля $\overline{H}_{||2,3}$ и средние по площади всех четырех квадрантов напряженности продольного магнитного поля $\overline{H}_{||}$.

Для каждой широтной группы пятен отдельно для тени и полутени были построены зависимости

$$k_{1,4} = \frac{\overline{H}_{||1,4}}{\overline{H}_{||}}, \quad (1)$$

$$k_{2,3} = \frac{\overline{H}_{||2,3}}{\overline{H}_{||}} \quad (2)$$

от $\text{tg}\Theta$. Угол Θ - гелиоцентрический угол центра пятна, который определяется как

$$\cos\Theta = \sin\varphi \sin B_0 + \cos\varphi \cos L \cos B_0,$$

где B_0 - гелиоширота центра солнечного диска, φ и L - гелиографическая широта и долгота центра пятна, соответственно.

На рис.2 приведены зависимости $k_{1,4}$ и $k_{2,3}$ от $\text{tg}\Theta$ для тени и полутени пятен в каждой широтной группе. Зависимости (1) и (2) строились отдельно для пятен, находившихся в восточном ($L < 0$) и западном ($L > 0$) полушариях Солнца. Через данные наблюдений методом наименьших квадратов проводились прямые $k = A \text{tg}\Theta + B$.

Анализ рис.2 позволил сделать следующие выводы:

1) Так как квадранты 1, 4 и, соответственно, 2, 3 меняются местами при перемещении пятна из восточного полушария Солнца в западное, то ход зависимостей связан только с положением квадрантов относительно луча зрения. Следовательно, распределение силовых линий магнитного поля исследуемых пятен соответствует осевой симметрии.

2) Независимо от гелиошироты пятна прослеживается восточно-западная асимметрия. Значения $k_{1,4}$ и $k_{2,3}$ в западном полушарии больше, чем в восточном и это различие увеличивается с переходом пятна к лимбу. Оно связано с разным наклоном силовых линий магнитного поля к лучу зрения в частях пятна, расположенных со стороны лимба и центра солнечного диска. Отсюда следует, что наблюдаемая асимметрия связана только с наклоном магнитной оси пятна к нормали к поверхности Солнца.

Определение угла отклонения оси пятна от нормали к поверхности Солнца проводилось методом преобразования векторов при повороте одной системы координат относительно другой [13]. Здесь мы приводим лишь

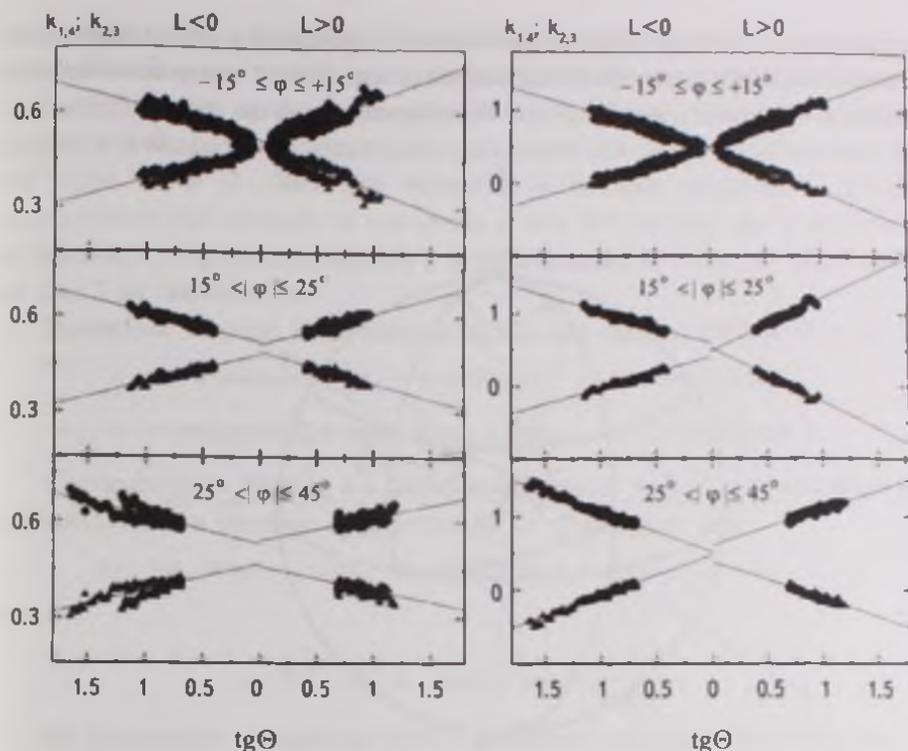


Рис.2. Изменение от центра к краю солнечного диска отношений $k_{1,4}$ (кружки) и $k_{2,3}$ (треугольники) в тени (левая панель) и полутени (правая панель) пятен. Прямые линии проведены методом наименьших квадратов. Для пятен в восточном полушарии $L < 0$, для пятен в западном полушарии $L > 0$. Каждая группа пятен, выделенная по широте φ , представлена своей зависимостью. Средняя величина вероятной ошибки составила ± 0.011 .

основные положения метода определения угла наклона магнитной оси пятна, который подробно изложен в [6]. Выражение для лучевой составляющей магнитного поля $H_{||}$, представленной через H_z - вертикальную, вдоль магнитной оси пятна, H_r - радиальную, вдоль радиуса магнитной трубки, образующей пятно и H_γ - азимутальную составляющие вектора магнитного поля в цилиндрических координатах имеет вид [13]:

$$H_{||} = H_z \cos\alpha \cos\gamma + H_r (\cos\Phi \sin\gamma - \sin\Phi \sin\alpha \cos\gamma) - H_\gamma (\sin\Phi \sin\gamma + \cos\Phi \sin\alpha \cos\gamma), \quad (3)$$

где угол $\gamma = \Theta - \beta$. Угол β дает величину угла наклона оси пятна в плоскости, совпадающей с лучом зрения (с осью Ox_1) и проходящей через центр Солнца. Ось Ox_1 прямоугольной системы координат, связанной с цилиндрической системой, лежит тоже в этой же плоскости, что и ось Ox (рис.3). Угол α определяет наклон оси пятна в перпендикулярной плоскости. Угол

Φ отсчитывается от оси OX_L против часовой стрелки. Ось OX_L в картинной плоскости совпадает с линией, соединяющей центр пятна с центром солнечного диска (ось OX рис.1, рис.3). Угол Φ меняется от 0 до 2π .

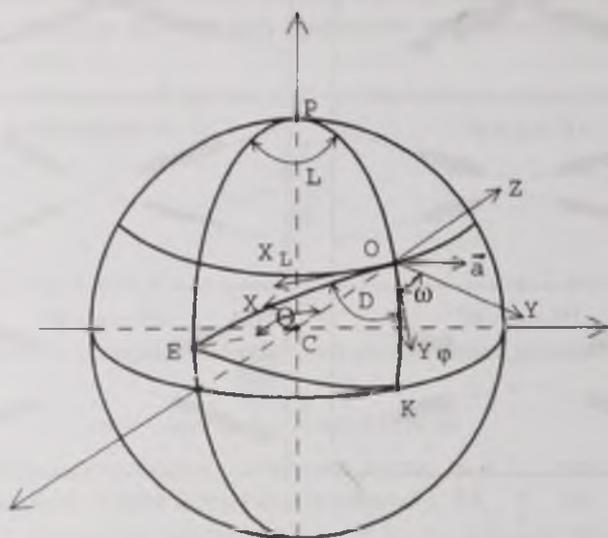


Рис.3. Используемые системы координат. Положительное направление осей показано стрелками (рис.4 из работы [6]).

Усреднение выражения (3) по площади тени и полутени в пределах 1-го и 4-го квадрантов и соответственно 2-го и 3-го квадрантов дает:

$$k_{1,4} = \frac{\bar{H}_{||1,4}}{H_{||}} = 1 + \frac{2 \bar{H}_r}{\pi H_{z1}} \operatorname{tg} \alpha - \frac{2 \bar{H}_f}{\pi H_{z1}} \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

$$k_{2,3} = \frac{\bar{H}_{||2,3}}{H_{||}} = 1 - \frac{2 \bar{H}_r}{\pi H_{z1}} \operatorname{tg} \alpha + \frac{2 \bar{H}_f}{\pi H_{z1}} \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

Вследствие вращения Солнца углы α и β для одного и того же пятна меняются. Их можно связать с углами ΔL и $\Delta \phi$, величины которых не зависят от вращения Солнца. Углы ΔL и $\Delta \phi$ определяют наклон магнитной оси пятна по долготе и широте. Для установления связи между углами α , β и ΔL , $\Delta \phi$, наряду с системой координат XYZ , была введена система координат $X_L Y_\Phi Z$. Оси OZ обеих систем совпадают и перпендикулярны к поверхности Солнца (рис.3).

Ось OX_L направлена на восток вдоль параллели, а ось OY_Φ направлена

вдоль меридиана к экватору. Система координат XYZ повернута вокруг оси OZ относительно $X_L Y_\varphi Z$ на угол ω , который меняется с изменением положения центра пятна на поверхности Солнца. Введен вектор \mathbf{a} , направление которого совпадает с направлением магнитной оси пятна и составляет с осью OZ углы α и β . Этот же вектор \mathbf{a} в системе координат $X_L Y_\varphi Z$ в меридиональной плоскости наклонен к оси OZ на угол $\Delta\varphi$ и на угол ΔL в плоскости, перпендикулярной к меридиональной. Углы α , β и $\Delta\varphi$, ΔL на рис.3 не обозначены.

Проекция вектора \mathbf{a} на координатные оси систем XYZ и $X_L Y_\varphi Z$ дает:

$$a_x = -a \cos\alpha \sin\beta; \quad a_y = a \cos\beta \sin\alpha; \quad a_z = a \cos\alpha \cos\beta, \quad (6)$$

$$a_{x_L} = -a \cos\Delta\varphi \sin\Delta L; \quad a_{y_\varphi} = a \cos\Delta L \sin\Delta\varphi; \quad a_z = a \cos\Delta\varphi \cos\Delta L. \quad (7)$$

Составляющие вектора \mathbf{a} в системе координат $X_L Y_\varphi Z$, выраженные через составляющие в системе координат XYZ, принимают вид:

$$a_{x_L} = a_x \cos\omega - a_y \sin\omega; \quad a_{y_\varphi} = a_y \cos\omega + a_x \sin\omega; \quad a_z = a_z, \quad (8)$$

где

$$\omega = 90^\circ - D \quad \text{и} \quad \sin D = \cos B_0 \frac{\sin L}{\sin \Theta}.$$

На основании выражений (6)-(8) получаем связь между углами $\Delta\varphi$, ΔL и углами α , β : [6]:

$$\operatorname{tg} \Delta L = \operatorname{tg} \beta \cos \omega + \operatorname{tg} \alpha \sin \omega, \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \Delta \varphi = \operatorname{tg} \alpha \cos \omega - \operatorname{tg} \beta \sin \omega. \quad (10)$$

В дальнейшем принимаем $\alpha = 0$. Тогда выражения (1), (2), (9) и (10) принимают вид:

$$k_{1,4} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\bar{H}_r}{H_{z1}} \operatorname{tg} \gamma, \quad (11)$$

$$k_{2,3} = 1 - \frac{2}{\pi} \frac{\bar{H}_r}{H_{z1}} \operatorname{tg} \gamma, \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \Delta L = \operatorname{tg} \beta \sin D, \quad (13)$$

$$\operatorname{tg} \Delta \varphi = -\operatorname{tg} \beta \cos D. \quad (14)$$

Зная $k_{1,4}$ и $k_{2,3}$ в каждой широтной группе при одних и тех же значениях Θ для восточного (E) и западного (W) полушариев, на основании выражений (11) и (12) можно установить связь между значениями углов γ для восточного и западного полушариев:

$$\operatorname{tg} \gamma_W = \operatorname{tg} \gamma_E \frac{k_{W1,4} - k_{W2,3}}{k_{E1,4} - k_{E2,3}}, \quad (15)$$

где углы $\gamma_W = \Theta + \beta$ и $\gamma_E = \Theta - \beta$. Определение углов γ_W и γ_E проводилось на основании выражения (15) и данных рис.2. Значения k_{E14} , k_{E23} и k_{W14} , k_{W23} брались при одинаковых значениях $\text{tg}\Theta$ для восточного и западного полушариев. По данным каждой широтной группы отдельно для тени и полутени пятен находилось среднее значение угла β

$$\beta = \frac{\gamma_W - \gamma_E}{2}.$$

Значения β для тени и полутени пятен, входящих в одну широтную группу, мало отличались между собой. В табл.2 представлены результаты вычислений среднего по всему пятну угла наклона магнитной оси β ($I \leq 0.9$) для каждой группы пятен. Положительные значения угла β означают, что магнитная ось пятна наклонена к западу.

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Широтная группа	$\beta, ^\circ$	$\Delta L, ^\circ$	$\Delta\varphi, ^\circ$
$-15^\circ < \varphi \leq 15^\circ$	+4	+4	-1
$15^\circ < \varphi \leq 25^\circ$	+2	+2	-1
$25^\circ < \varphi \leq 45^\circ$	+1	+1	-1

На основании выражений (13) и (14) были вычислены углы ΔL и $\Delta\varphi$ для каждой группы пятен. Результаты вычислений представлены в табл. 2, ошибки метода определения углов β , ΔL и $\Delta\varphi$ не превышают 15%. Положительные значения ΔL означают, что магнитная ось пятна наклонена к западу, отрицательные значения $\Delta\varphi$ - наклон магнитной оси к северу.

Данные табл.2 показывают, что магнитная ось пятна наклонена в среднем на $1-4^\circ$ к западу и на 1° к северу. Величины угла наклона в пределах точности наших вычислений не зависят от широты пятна.

3. Заключение. Проведено исследование структуры магнитного поля восьми одиночных пятен по наблюдениям его лучевой составляющей. Одиночные пятна проходили по диску Солнца в 2010-2011гг. На основании 47 долговременных серий магнитограмм и изображений активных областей в континууме, полученных на HMI/SDO, выявлено, что магнитная ось силовых линий магнитного поля одиночного пятна наклонена в среднем на $1-4^\circ$ к западу и на 1° к северу. Ошибки определения угла наклона магнитной оси пятна составили не более 15%.

Наклон к западу магнитной оси подтверждается сменой знака продольного поля у пятен. Появление противоположной полярности, по отношению к

основной, в полутени и затем в тени пятен вблизи лимба происходит на меньших долготах у пятен в западном полушарии, чем у пятен в восточном полушарии. Наклон к западу - это наклон в направлении противоположном направлению движения магнитных структур вследствие вращения Солнца. Величина угла наклона, в пределах точности наших вычислений, не зависит от гелиографической широты пятна. Одной из вероятных причин, которая может приводить к такому наклону оси магнитного поля пятна, может быть связана с тем, что 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, как правило, соответствует лидирующей, западной, части петли. Исследования, проведенные в работе [14], показывают, что в магнитных трубках, формирующих тени ведущих и хвостовых пятен активных областей, в среднем силовые линии оказываются более радиальными. В большинстве случаев, в активных областях длина участка силовой линии из ведущего пятна до вершины силовой линии меньше длины участка от вершины силовой линии до ее восточного основания.

В работе [6], где по данным наблюдений продольного магнитного поля исследовались одиночные пятна, наблюдавшиеся в 1978, 1999, 2000 гг. на фазе роста 21 и 23 циклов активности вблизи их максимумов, был получен наклон магнитной оси пятен на запад на $8-10^\circ$. Для пятен 2010-2011 гг. мы получили угол наклона оси к западу на $1-4^\circ$. В 2010-2011 гг. Солнце находилось на начальной фазе роста своей активности и несколько предшествующих лет солнечная активность была на аномально низком уровне. Возможно, что полученное различие в величине наклона магнитной оси одиночных пятен связано с фазой цикла активности Солнца.

Автор благодарен NASA/SDO и HMI научной команде за возможность доступа к базам данных по сети Интернет.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-02-00221 А.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым,
Россия, email: olg@crasrimea.ru

MAGNETIC FIELD OF SUNSPOTS DURING THE
RISING PHASE OF CYCLE 24

O.S.GOPASYUK

Structure of a magnetic field of single sunspots during the rising phase of solar cycle 24 is studied. Long-term series of the magnetograms and continuum images obtained from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) on NASA's Solar Dynamics Observatory (SDO) were used. We received that the magnetic axis of the magnetic force lines of a single sunspot is inclined to the west. Averaged value of the inclination angle is 1-4° and does not depend on the sunspots heliographic latitude.

Key words: *Sun: sunspots magnetic fields*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Т.Каулинг*, Магнитная гидродинамика, М., Изд-во иностр. лит., 1959.
2. *В.Бумба*, Изв. Крымск. астрофиз. обсерватории, **23**, 253, 1960.
3. *С.И.Гопасюк*, Изв. Крымск. астрофиз. обсерватории, **35**, 139, 1966.
4. *Р.Х.Гайнуллина, Т.М.Минасянц*, Астрон. циркуляр, **1150**, 5, 1981.
5. *С.Обашев, Р.Х.Гайнуллина, Т.М.Минасянц, Г.С.Минасянц*, Вестник АН Каз. ССР, **3**, 36, 1981.
6. *O.S.Gopasyuk*, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **19**, 126, 2003.
7. *R.Howe, J.Christensen-Dalsgaard, F.Hill et al.*, Astrophys. J. Lett., **767**, L20, 2013.
8. *W.Livingston, M.J.Penn, L.Svalgaard*, Astrophys. J. Lett., **757**, L8, 2012.
9. *P.H.Scherrer, J.Schou, R.I.Bush et al.*, Solar Phys., **275**, 207, 2012.
10. *J.Schou, P.H.Scherrer, R.I.Bush et al.*, Solar Phys., **275**, 229, 2012.
11. *W.D.Pesnell, B.J.Thompson, P.C.Chamberlin*, Solar Phys., **275**, 3, 2012.
12. *S.I.Gopasyuk, O.S.Gopasyuk*, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **14**, 389, 1998.
13. *С.И.Гопасюк*, Изв. Крымск. астрофиз. обсерватории, **57**, 107, 1977.
14. *Ю.С.Загайнова, В.Г.Файнштейн, Г.В.Руденко, В.Н.Обридко*, Астрон. ж., **92**, 180, 2015.