

УДК 523.98

Магнитные поля солнечных пятен

О.С. Гопасюк

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
olg@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. По данным наблюдений продольного магнитного поля и изображений в континууме одиночных пятен, полученным на Solar Dynamics Observatory (SDO) с инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), проведено исследование структуры магнитного поля одиночных пятен. Были отобраны одиночные пятна, проходившие по диску Солнца с июня 2010 г. по январь 2011 г. Этот период времени приходится на начальную фазу роста 24 цикла активности. Продольная составляющая магнитного поля несет в себе полную информацию о структуре вектора магнитного поля, в том числе и о наклоне магнитной оси пятна. Был выявлен наклон магнитной оси силовых линий магнитного поля одиночного пятна на $1\text{--}4^\circ$ к западу и на 1° к северу. Величина угла наклона оси не зависит от гелиографической широты, на которой находится пятно.

SUNSPOT MAGNETIC FIELDS, by *O.S. Gopasyuk*. Based on observations of the longitudinal magnetic field and continuum images of single sunspots obtained at the Solar Dynamics Observatory (SDO) with the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) we have studied the magnetic field structure of single sunspots. The single sunspots were selected passing across the solar disk since June 2010 to January 2011. This period of time falls within the initial rising phase of cycle 24. The magnetic field longitudinal component carries information about the structure of the magnetic field vector, including the inclination of the sunspot magnetic axis. The inclination of the magnetic axis of single sunspot's magnetic field lines was found to be $1\text{--}4^\circ$ to the west and 1° to the north. The value of the axis inclination angle does not depend on the heliographic latitude where the spot is located.

Ключевые слова: Солнце, одиночные пятна, магнитные поля

1 Введение

В середине двадцатого века Каулинг (1959) предложил модель магнитного поля пятна в виде расходящегося с высотой симметричного веера силовых линий. Ось веера была ориентирована перпендикулярно поверхности Солнца. Дальнейшие исследования, проведенные Бумбой (1960), Гопасюком (1966), Обашевым и др. (1982) дали основание полагать, что ось веера силовых линий поля наклонена к востоку на $7\text{--}30^\circ$. Однако Гопасюк (2003), анализируя данные наблюдений магнитного поля одиночных пятен, получила, что магнитная ось силовых линий пятна наклонена к западу на $8\text{--}10^\circ$. Исследования Гопасюк (2003) относились к фазам роста 21 и 23 циклов солнечной активности вблизи их максимумов.

В 2008–2009 гг. Солнце проходило необычную фазу – длительный минимум с чрезвычайно низким уровнем активности. Это послужило мотивацией для наших исследований структуры магнитного поля одиночных пятен, проходивших по диску Солнца в самом начале фазы роста 24 цикла.

2 Данные наблюдений и метод исследования

Исследования проведены по данным наблюдений продольного магнитного поля, полученным на Solar Dynamics Observatory (SDO) (Песнелл и др., 2012) с инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) (Шеппер и др., 2012; Шу и др., 2012).

Таблица 1. Данные наблюдений

Широтная зона	NOAA	Дата и время наблюдений	$L, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$
$15^\circ \leq \varphi $	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
	11133	00:00 UT 07.12.2010 – 23:48 UT 12.12.2010	E45 – W34	N14
$15^\circ < \varphi \leq 25^\circ$	11084	00:00 UT 29.06.2010 – 23:48 UT 04.07.2010	E44 – W33	S19
	11147	00:00 UT 19.01.2011 – 23:48 UT 23.01.2011	E31 – W23	N24
$25^\circ < \varphi \leq 45^\circ$	11115	00:00 UT 17.10.2010 – 23:48 UT 23.10.2010	E50 – W38	S29
	11140	00:00 UT 03.01.2011 – 23:48 UT 08.01.2011	E39 – W35	N31

Нами были отобраны долговременные серии наблюдений 8 одиночных пятен, проходивших по диску Солнца с июня 2010 г. по январь 2011 г. (табл. 1). Временное разрешение данных составило 720 с. Пятна находились как в северном, так и в южном полушариях Солнца. В зависимости от широты φ , пятна были распределены на три группы: 1) $15^\circ \leq |\varphi|$; 2) $15^\circ < |\varphi| \leq 25^\circ$; 3) $25^\circ < |\varphi| \leq 45^\circ$. Таким образом, в первую группу попало четыре, во вторую – два и в третью – два пятна (табл. 1). Дата и время наблюдений пятен, а также их гелиографические координаты, широта φ и долгота L , представлены в табл. 1.

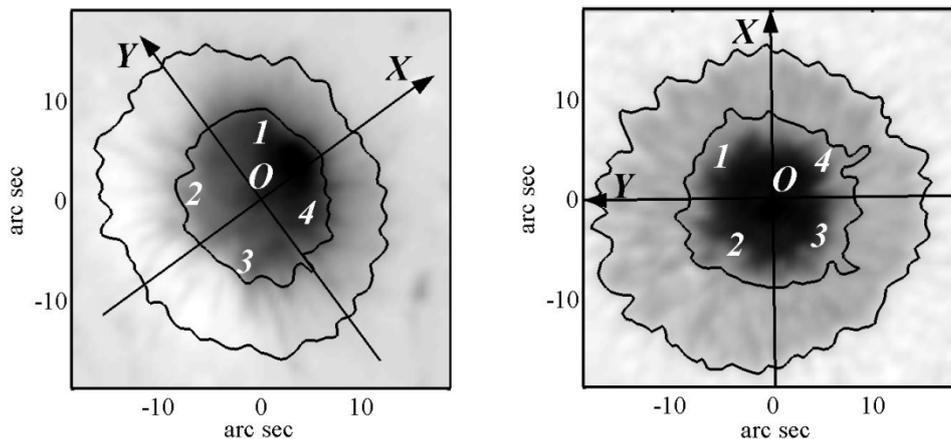


Рис. 1. Карты продольного магнитного поля активной области NOAA 11084, полученные на HMI/SDO. Левая панель: 23:00 UT 29.06.2016, $L = -33^\circ$; правая панель: 12:00 UT 2.07.2016, $L = 0^\circ$. Сплошные линии – границы тени и полутени пятна. Показана система координат, начало которой O совмещено с центром пятна. Положительное направление оси OX совпадает с направлением на центр солнечного диска. Цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены номера квадрантов

Использование одновременных записей активных областей в континууме позволяет провести детальный анализ структуры магнитного поля в пятнах. В каждый момент времени определялись границы тени и полутени, среднее положение центра пятна. Распределение магнитного поля в одиночных пятнах наиболее близко соответствует случаю осевой симметрии.

На рис. 1 в качестве примера приведены карты продольного магнитного поля AR 11084 с нанесенными границами тени и полутени для двух положений пятна на диске Солнца: в восточном полушарии и на центральном меридиане. Вводилась система координат, начало которой совмещалось с центром пятна и положительной осью OX , направленной на центр солнечного диска (рис. 1). Ось OZ направлена вертикально вверх. Оси OX и OY разделили пятно так, что 1-й и 4-й квадранты располагались со стороны центра солнечного диска, а 2-й и 3-й – со стороны лимба.

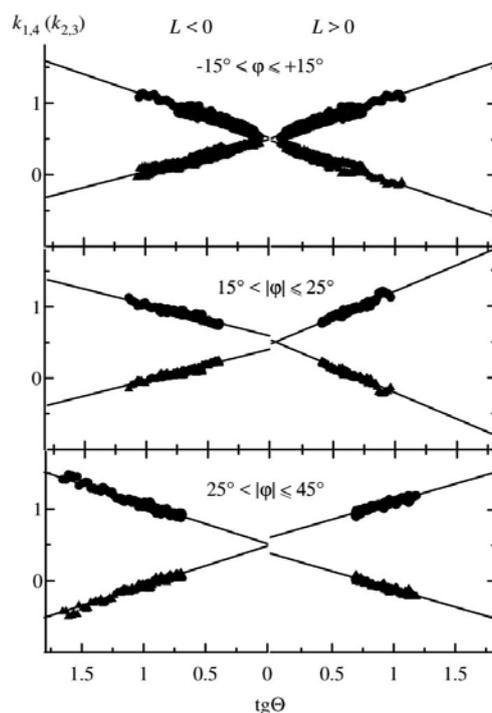


Рис. 2. Изменение от центра к краю солнечного диска отношений $k_{1.4}$ (кружки) и $k_{2.3}$ (треугольники) в полутени пятен. Прямые линии проведены методом наименьших квадратов. Для пятен в восточном полушарии $L < 0$, для пятен в западном полушарии $L > 0$. Каждая группа пятен, выделенная по широте φ , представлена своей зависимостью. Средняя величина вероятной ошибки составила ± 0.011

Отдельно для тени и полутени каждого пятна были вычислены отношения средних по площади напряженностей продольного магнитного поля

$$k_{1.4} = \frac{\bar{H}_{1.4}}{\bar{H}}, \quad (1)$$

$$k_{2.3} = \frac{\bar{H}_{2.3}}{\bar{H}}, \quad (2)$$

где $\bar{H}_{1.4}$, $\bar{H}_{2.3}$ и \bar{H} – средние по площади первого и четвертого, второго и третьего и всех четырех квадрантов напряженности магнитного поля соответственно.

Для каждой широтной зоны, отдельно для тени и полутени пятна, были построены зависимости $k_{1.4}$ и $k_{2.3}$ от $\text{tg}\Theta$ (Θ – гелиоцентрический угол центра пятна). Зависимости строились отдельно для восточного и западного полушария Солнца. Через данные наблюдений методом наименьших квадратов проводились прямые. Зависимости в тени и полутени пятен показали одинаковый ход. На рис. 2 в качестве примера приведены зависимости отношений средних напряженностей для полутени пятен.

Анализ рис. 2 показал, во-первых, что распределение силовых линий магнитного поля исследуемых пятен соответствует осевой симметрии. Это следует из того, что ход зависимостей связан только с положением квадрантов относительно луча зрения – квадранты 1, 4 и, соответственно, 2, 3 меняются местами при перемещении пятна из восточного полушария Солнца в западное. Во-вторых, во всех широтных зонах прослеживается восточно-западная асимметрия. Значения отношений $k_{1.4}$ и $k_{2.3}$ в западном полушарии больше, чем в восточном. Различие увеличивается с переходом пятна к лимбу и связано с разным наклоном силовых линий магнитного поля к лучу зрения в частях пятна, расположенных со стороны лимба (квадранты 2 и 3) и центра солнечного диска (квадранты 1 и 4). Отсюда следует, что наблюдаемая асимметрия связана только с наклоном магнитной оси пятна к нормали к поверхности Солнца.

Угол отклонения оси пятна от нормали к поверхности Солнца был определен методом преобразования векторов при повороте одной системы координат относительно другой, разработанной Гопасюком (1977).

После усреднения по площади квадрантов продольного магнитного поля, выраженного через составляющие вектора в цилиндрических координатах, были получены следующие выражения:

$$k_{1.4} = 1 + \frac{2 \bar{H}_r}{\pi \bar{H}_z} \text{tg} \gamma, \quad (3)$$

$$k_{2.3} = 1 - \frac{2 \bar{H}_r}{\pi \bar{H}_z} \text{tg} \gamma \quad (4)$$

где угол γ определяет наклон магнитной оси пятна в плоскости луча зрения и представляет собой разность между гелиоцентрическим углом центра пятна Θ и углом наклона оси пятна в плоскости, совпадающей с лучом зрения и проходящей через центр Солнца β . \bar{H}_z и \bar{H}_r – средние по площади квадрантов вертикальная и радиальная составляющие вектора магнитного поля.

Зная $k_{1.4}$ и $k_{2.3}$ в каждой широтной группе при одних и тех же значениях гелиоцентрического угла центра пятна для восточного и западного полушарий мы установили связь между значениями углов γ для восточного (E) и западного (W) полушарий

$$\text{tg} \gamma_W = \text{tg} \gamma_E \frac{k_{W 1.4} - k_{W 2.3}}{k_{E 1.4} - k_{W 2.3}}$$

и вычислили 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 . Положительные значения означают, что магнитная ось пятна наклонена к западу.

Наклон магнитной оси пятна по долготе и широте определяют углы ΔL и $\Delta \varphi$ (Гопасюк, 2003): $\text{tg } \Delta L = \text{tg } \beta \cdot \sin D$ и $\text{tg } \Delta \varphi = -\text{tg } \beta \cdot \cos D$, где $\sin D = \cos B_0 \frac{\sin L}{\sin \Theta}$.

Таблица 2. Угол наклона магнитной оси пятна

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

Значения углов ΔL и $\Delta \varphi$ представлены в табл. 2. Положительные значения ΔL означают, что магнитная ось пятна наклонена к западу, отрицательные значения $\Delta \varphi$ – наклон магнитной оси к северу. Таким образом, мы получили, 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

Исследование структуры магнитного поля восьми одиночных пятен, проходивших по диску Солнца в 2010–2011 гг. было проведено на основании одновременных данных наблюдений продольного магнитного поля и изображений активных областей в континууме. Данные наблюдений были получены на HMI/SDO. Выявлен наклон магнитной оси силовых линий магнитного поля пятна к западу на $1-4^\circ$ и к северу на 1° . Величина угла наклона, в пределах точности наших вычислений, не зависит от гелиографической широты пятна.

Какие причины могут приводить к наклону магнитной оси пятна на запад?

1. Исследования крутильных колебаний пятен (Гопасюк и др., 1988) и исследования по гелиосейсмологии (Косовичев и др., 1997; Томпсон и др., 2003; Миеш, 2005) показывают, что в подфотосферных слоях, где проходит магнитная петля, образующая пятна на поверхности Солнца, плазма вращается медленнее, чем в фотосфере.
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, как правило, соответствует лидирующей, западной части петли.

Мы получили, что угол наклона магнитной оси пятен, наблюдавшихся на начальной фазе роста 24 цикла (2010–2011 гг.), меньше наклона, полученного для пятен, наблюдавшихся на фазе роста 21 и 23 циклов (1978, 1999, 2000 гг.) вблизи их максимумов. Исследования по гелиосейсмологии показывают, что скорость внутреннего вращения Солнца меняется как с циклом его активности, так и от цикла к циклу (Миеш, 2005; Антия, Сарбани, 2010; Брумхолл и др., 2014). В частности, было установлено, что внутреннее вращение Солнца на высоких широтах в 24 цикле замедлилось по сравнению с предыдущим циклом (Хоув и др., 2013). Вероятно, что полученные нами результаты отражают вариации скорости вращения глубоких слоев Солнца.

Автор благодарен NASA/SDO и HMI научной команде за возможность доступа к базам данных по сети Интернет. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-00221 А.

Литература

- Антиа, Сарбани (Antia H.M., Basu Sarbani) // *Astrophys. J.* 2010. V. 720. P. 494.
- Брумхолл и др. (Broomhall A.-M., Chatterjee P., Howe R., et al.) // *Space Sci. Rev.* 2014. V. 186. Issue 1–4. P. 191.
- Бумба В. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1960. Т. 23. С. 253.
- 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 (Gopasyuk O.S.) // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2003. V. 19. P. 126.
- Гопасюк С.И., Лямова Г.В., Ханейчук В.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1988. Т. 79. С. 34.
- Каулинг Т. // *Магнитная гидродинамика.* М.: Изд-во иностр. лит. 1959.
- Косовичев и др. (Kosovichev A.G., Schou J., Scherrer P.H., et al.) // *Solar Phys.* 1997. V. 170. N. 1. P. 43.
- Миеш (Miesch Mark S.) // *Living Rev. Solar Phys.* 2005. V. 2.
- Обашев и др. (Obashev S.O., Gainullina G.Kh., Minasyants T.M., Minasyants G.S.) // *Solar Phys.* 1982. V. 78. P. 59.
- Песнелл и др. (Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C.) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 3.
- Томпсон и др. (Thompson M.J., Christensen-Dalsgaard J., Miesch M.S., Toomre J.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2003. V. 41. P. 599.
- Хоув и др. (Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al.) // *Astrophys. J. Lett.* 2013. V. 767. L. 20.
- Шеррер и др. (Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al.) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 207.
- Шу и др. (Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I., et al.) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 229.