

УДК 523.98

Вращение пятен в активной области NOAA 10930

О.С. Гопасюк

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,
АР Крым, Украина, 98409
olg@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 16 октября 2013 г.

Аннотация. Вращение пятен активной области NOAA 10930 было исследовано по данным продольного магнитного поля и доплеровских скоростей, полученных в фотосферных линиях на спектрополяриметре SP/SOT, установленном на борту *Hinode*. В предположении осевой симметрии в обоих пятнах были вычислены средние по площади вертикальные, радиальные и азимутальные составляющие векторов магнитного поля и скорости. Плазма в пятнах вращалась в противоположных направлениях: в лидирующем пятне по часовой стрелке, в хвостовом – против часовой стрелки. Магнитные силовые трубки, которые образовали на поверхности Солнца пятна активной области, были закручены в одну сторону – по часовой стрелке. Электрические токи, которые возникли вследствие вращения и скручивания магнитных трубок, также протекали в одном направлении. Максимальных значений азимутальные составляющие магнитного поля и скорости в обоих ядрах достигли 11.12.2006. К началу вспышки балла X3.4 (13.12.2006) они стали практически равными нулю.

ROTATION OF SUNSPOTS IN SOLAR ACTIVE REGION NOAA 10930, *by O.S. Gopasyuk.* Rotation of the sunspots of active region NOAA 10930 has been investigated using magnetograms and dopplergrams taken with the Solar Optical Telescope aboard *Hinode*. The vertical, radial and azimuthal axisymmetrical components of both magnetic and velocity field vectors have been reconstructed for the both sunspots. Plasma in the leading sunspot rotated clockwise, in the following sunspot plasma rotated counterclockwise. The magnetic flux tubes which formed sunspots of the active region on the solar surface were twisted clockwise. The azimuthal field components of both sunspots were of like sign. Electric currents generated as a result of rotation and twisting of magnetic flux tubes were directed in one direction. Azimuthal components of magnetic and velocity fields of both sunspots reached the maximum on December 11, 2006. At the start of X3.4 flare (December 13, 2006) their values became equal to zero.

Ключевые слова: Солнце, фотосфера, пятна, магнитные поля

1 Введение

Наблюдения активных областей в белом свете показали эволюцию пятен, в частности их вращение (Эвершед, 1910; Малтби, 1964; Гопасюк, 1965). Современные космические телескопы позволяют производить наблюдения вращающихся пятен и других магнитных структур с высоким пространственным и временным разрешением (Найтингейл и др., 2002; Браун и др., 2001; Гопасюк, Косовичев,

2011). Вращение пятен приводит к закручиванию силовых линий поля пятна таким образом, что, чем дальше от центра пятна, тем сильнее закручиваются в спираль его силовые линии (Гопасюк, 1965, 1981). Угол закрученности структуры поперечного поля на границе полутень – фотосфера соответствует углу поворота пятна, вычисленного по изображениям в белом свете. Однако это ничего не говорит о величине азимутального поля. Величина азимутального поля может быть вычислена, например, методом, предложенным Гопасюком и Гопасюк (1998). Скорость вращения пятен, вычисленная по данным в белом свете, в 5–6 раз меньше азимутальной скорости, вычисленной по полю лучевых скоростей (Гопасюк, 1981, 1982; Гопасюк, Косовичев, 2011). Появление вспышек тесно коррелирует с вращением пятен (Гопасюк, 1965; Гопасюк, Лазарева, 1986; Браун и др., 2003; Ян, Ку, 2007; Ян и др., 2008).

Общепринято, что источником энергии солнечных вспышек является магнитное поле солнечной атмосферы. Во время вспышки происходит стремительная реализация магнитной энергии предварительно сохраненной в магнитном поле активной области. Теперь широко признано, что вспышки получают свою энергию из свободной энергии, сохраненной в непотенциальных магнитных полях активных областей (Зирин, Танака, 1973; Хагъярд и др., 1984). Однако как происходит накопление и реализация магнитной энергии все еще недостаточно хорошо известно и остается очень важной проблемой в солнечной физике.

Магнитное поле пятен может проявляться в форме скрученных магнитных силовых трубок или петель. Как показывают наблюдения, скрученные петли существуют почти во всех местах вспышки. Закручивание магнитных силовых трубок может происходить, в частности, в результате вращения пятен активной области (АО).

В настоящей работе мы представляем результаты исследования вращения пятен активной области NOAA 10930 по данным фотосферных наблюдений продольного магнитного поля и доплеровских скоростей, полученным на спектрополяриметре *Hinode/SOT*.

2 Наблюдения

Активная область NOAA 10930 наблюдалась во время минимальной фазы 23 цикла и была единственной в течение своего прохождения по диску Солнца. С 4.12.2006 по 18.12.2006 по данным GOES-12 в ней было зарегистрировано 113 рентгеновских вспышек различной мощности, в том числе 4 вспышки класса X.

АО 10930 состояла из двух пятен противоположной полярности, окруженных общей полутенью. Северное (лидирующее) большое хорошо развитое пятно имело отрицательную полярность, оно сохраняло свою форму в течение всего времени наблюдений. Южное (хвостовое) пятно положительной полярности испытывало сильные изменения – его площадь активно увеличивалась до 12.12.2006, после 13.12.2006 началось разрушение пятна.

Исследованиям структуры магнитного поля, вращения пятен и вспышкам в АО 10930 посвящено много работ (Исобе и др., 2007; Жанг и др., 2007; Магара, Тсунета, 2008; Мин, Чэй, 2009; Су и др., 2009). В частности, было показано, что хвостовое пятно положительной полярности вращалось вокруг своей оси и вокруг лидирующего пятна. По данным, полученным на *Hinode/SOT* в полосе G, скорость вращения пятна вокруг своей оси достигала $8^\circ/\text{час}$ (Мин, Чэй, 2009).

Спектрополяриметр солнечного оптического телескопа (SP/SOT) (Ичимото и др., 2008; Суематсу и др., 2008; Тсунета и др., 2008) на борту *Hinode* (Косуги и др., 2007) регистрирует профили параметров Стокса I , U , V и Q в двух магниточувствительных фотосферных линиях железа Fe I $\lambda 6301.5 \text{ \AA}$ и Fe I $\lambda 6302.5 \text{ \AA}$. Карты параметров Стокса получают путем сканирования АО щелью спектрополяриметра. Пространственное разрешение $0.295''/\text{пиксел}$ вдоль щели и $0.317''/\text{пиксел}$ в направлении сканирования. Нами был выбран временной интервал 03:40 UT 09.12.2006 – 05:00 UT 14.12.2006, когда АО находилась недалеко от центра солнечного диска (табл. 1). В этот период в АО было зарегистрировано 34 рентгеновских вспышки классов B, C, X, в том числе вспышка балла X3.4, которая произошла 13.12.2006. Инверсии данных *Hinode SOT/SP* проводились спектрополяриметрическим центром CSAC национального центра атмосферных исследований NCAR

Таблица 1. Данные наблюдений и основные характеристики вращения пятен АО 10930

Дата	03:40 UT 09.12.2006 – 17:40 UT 12.12.2006	
	Северное пятно	Южное пятно
Широта	S05	S07
Долгота	E31 – W36	E30 – W35
Радиус зоны, r	18''	8''
H_l , Гс	2047	1218
P , сут	6.1	6.1
Амплитуда H_f , Гс	1765.9	2978.7
Амплитуда V_f , м/с	538.1	402.4
φ/l , °/км	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$

(<http://www.csac.hao.ucar.edu/>). Изображения АО в континууме использовались для определения центра и границ пятен АО.

3 Вращение пятен активной области

Продольная составляющая магнитного поля была определена как $H_{\parallel} = f|H| \cos \gamma$, где H – напряженность магнитного поля, f – фактор заполнения, γ – угол наклона вектора магнитного поля к лучу зрения.

В лидирующем пятне была выделена зона радиусом 18'', в хвостовом – зона радиусом 8''. На рис. 1 в качестве примера приведено изображение АО в континууме вблизи центра солнечного диска с выделенными зонами.

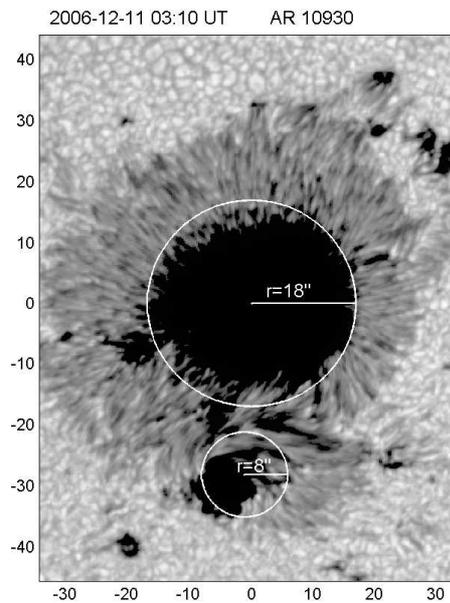


Рис. 1. Изображение в континууме АО вблизи центра солнечного диска. Окружностями выделены зоны радиусом $r = 18''$ в северном пятне и радиусом $r = 8''$ – в южном пятне

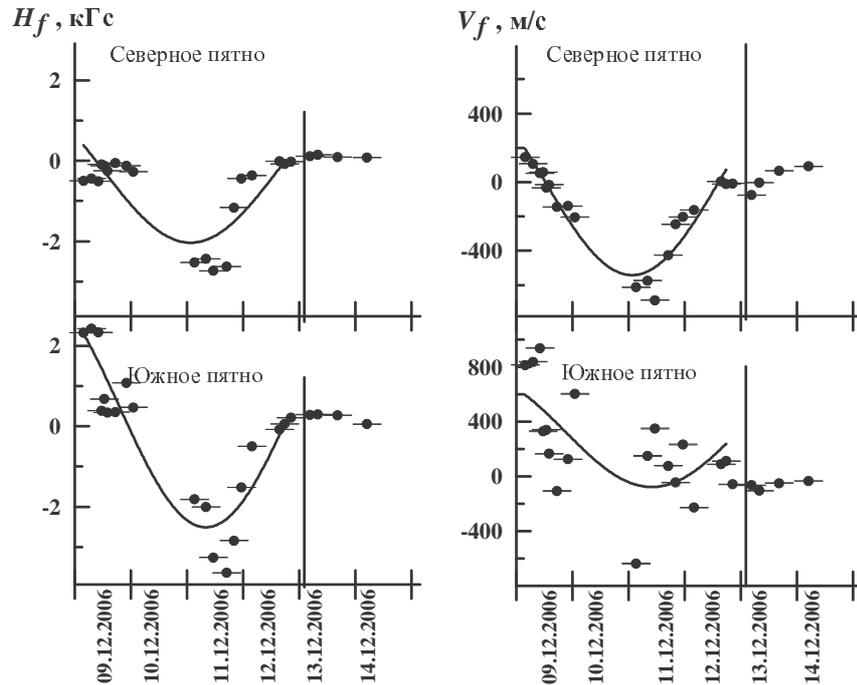


Рис. 2. Изменение со временем азимутальных составляющих магнитного поля H_f и скорости V_f северного и южного пятен АО 10930. Показана величина вероятной ошибки. Через данные наблюдений методом наименьших квадратов проведены синусоиды с периодом $P = 6.1$ сут. Вертикальной линией отмечено время максимальной фазы вспышки балла X3.4

В предположении осевой симметрии по лучевым составляющим магнитного поля и скорости были восстановлены средние по площади выделенных зон вертикальные H_z (V_z), радиальные H_r (V_r) – вдоль радиуса пятна, и азимутальные H_f (V_f) составляющие векторов магнитного поля и скорости (Гопасюк, Гопасюк, 1998; Гопасюк, Гопасюк, 2005). Все составляющие показали изменения со временем. Изменения средних по площади зон азимутальных составляющих обоих векторов в северном и южном пятнах в зависимости от времени представлены на рис. 2. Вертикальными линиями отмечено время максимальной фазы вспышки X3.4 (13.12.2006).

Наличие азимутальной составляющей вектора магнитного поля свидетельствует о закрученности силовых линий магнитного поля пятна, присутствие азимутальной составляющей вектора скорости – о вращении газа в пятне. Азимутальные составляющие достигли максимальных значений к 17:00 UT 11.12.2006, после чего стали уменьшаться. Вращение газа замедлилось, уменьшилась закрученность силовых линий магнитного поля. К 17:40 UT 12.12.2006 составляющие H_f и V_f в обоих ядрах приблизились к нулевым значениям, и на момент вспышки X3.4 (13.12.2006) азимутальные составляющие уже не испытывали существенных изменений.

Изменения азимутальных составляющих скорости и магнитного поля северного и южного пятен происходили синхронно. Силовые линии магнитного поля обоих пятен были закручены в одну сторону – по часовой стрелке. При этом вращение плазмы происходило в противоположных направлениях: в лидирующем пятне плазма вращалась по часовой стрелке, в хвостовом – против часовой стрелки.

Данные составляющих во временном интервале 03:40 UT 09.12.2006 – 17:40 UT 12.12.2006 хорошо аппроксимируются синусоидой

$$y = A \cdot \sin \left(\frac{2\pi t}{P} + \alpha \right),$$

где A , P , α – амплитуда, период и начальная фаза соответственно. В табл. 1 представлены период и амплитуды азимутальных составляющих магнитного поля H_f и скорости V_f . Период колебаний составил 6.1 сут.

4 Дискуссия

Рассмотрим магнитную петлю, образующую на поверхности Солнца пятно. В некоторый момент времени в магнитной петле появляется возмущение в виде крутильной волны, которое приводит к закручиванию осевого поля H_l . Возмущение закручивания будет распространяться вдоль магнитного поля с локальной скоростью волны Альвена. Мы считаем, что возмущение таково, что сечение трубки вращается как жесткое образование. Тогда, если на одном конце трубки длиной l осевое магнитное поле H_l закручивается на угол φ (в радианах) по отношению к другому концу, то создается азимутальное магнитное поле напряженностью (Альвен, Фельтмахер, 1967; Пикельнер, 1961)

$$H_f = r \frac{\varphi}{l} H_l, \quad (1)$$

где r – расстояние от магнитной оси трубки и в пределе равно ее радиусу, l – длина магнитной трубки, простирающейся от уровня фотосферы в хромосферу. Предполагаем, что сечение магнитной трубки круглое и аксиальное поле H_l ее однородно по сечению.

Всякое вращение магнитного поля сопровождается появлением электрического тока или изменением уже существующего тока. Присутствие азимутальной составляющей поля H_f означает, что электрический ток течет вдоль трубки.

Величина тока на уровне фотосферы, необходимая для создания азимутального поля данной величины на внешних границах магнитной трубки, определяется на основании уравнения Максвелла

$$I_l = \frac{c H_f r}{2}, \quad (2)$$

где r – радиус сечения магнитной трубки.

Вращение магнитных трубок, вероятно, порождается вихревыми движениями плазмы. Эти движения создают циркулирующий в магнитной трубке переменный по знаку и величине электрический ток (рис. 3). В обоих пятнах электрический ток был направлен в одну сторону. Максимальные значения электрических токов составили в северном пятне $I_l = 5.35 \cdot 10^{12}$ А при плотности тока $j_z = 10^4$ А/км² и в южном пятне $I_l = 3.17 \cdot 10^{12}$ А при плотности тока $j_z = 3 \cdot 10^4$ А/км².

Из (1) и (2) находим угол скручивания магнитной трубки, отнесенный к ее длине l

$$\frac{\varphi}{l} = \frac{2\pi}{c} \frac{I_l}{\Phi_l}, \quad (3)$$

где $\Phi_l = \pi r^2 H_l$ – магнитный поток через сечение трубки; Φ_l остается постоянным при сжатии и расширении контура. Для I_l справедливо условие квазистационарности; он, как и магнитный поток, остается постоянным вдоль магнитной трубки. Поэтому величина φ/l – величина постоянная, что означает, что закрученность магнитного поля не зависит от неоднородности параметров трубки по длине.

На основании данных наблюдений (табл. 1) для северного пятна $\varphi/l = 3.8 \cdot 10^{-30}$ /км, а для южного пятна эта величина оказалась в шесть раз большей – $\varphi/l = 2.4 \cdot 10^{-20}$ /км.

Таким образом, мы получили, что магнитные силовые трубки, образовавшие на поверхности Солнца АО 10930, находившиеся по обе стороны от нулевой линии продольного магнитного поля, были скручены в одном направлении (рис. 2). Электрические токи, которые возникли вследствие вращения и скручивания магнитных жгутов, направлены в одну сторону (рис. 3). Согласно закону

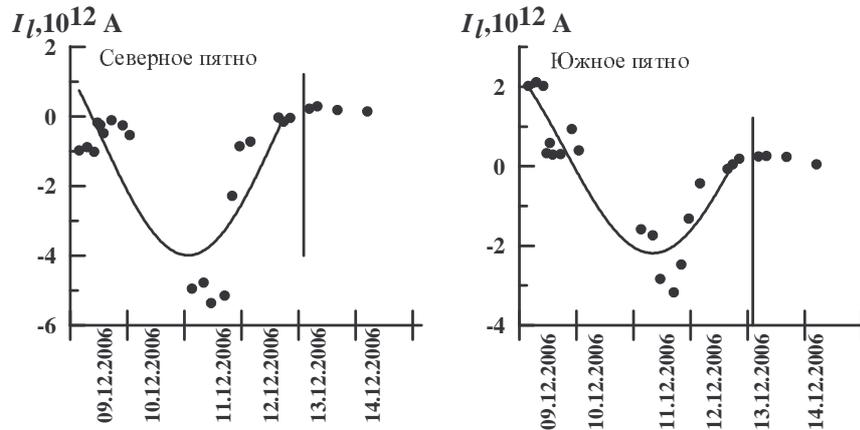


Рис. 3. Изменение со временем вертикального электрического тока в северном и южном пятнах АО 10930. Через данные наблюдений методом наименьших квадратов проведены синусоиды с периодом $P = 6.1$ сут. Вертикальной линией отмечено время максимальной фазы вспышки балла X3.4

Ампера, параллельные магнитные трубки, в которых протекает ток одного знака, притягивают друг друга. Оставаясь в течение некоторого времени в таком положении, они начинают проникать друг в друга, что приводит к внезапному сжатию тока в точках контакта и последующей диссипации энергии, связанной с этим током (Голд, Хоул, 1960).

5 Заключение

Исследование активной области NOAA 10930 по данным фотосферного продольного магнитного поля и доплеровских скоростей, полученных на спектрополяриметре *Hinode/SOT*, показало, что и лидирующее пятно АО отрицательной полярности, и хвостовое пятно положительной полярности вращались. Об этом свидетельствует наличие азимутальных составляющих скорости и магнитного поля (рис. 2). Плазма в северном и южном пятнах вращалась в противоположных направлениях: в северном – по часовой, а в южном – против часовой стрелки. Магнитное поле в обоих пятнах АО было закручено в одну сторону – по часовой стрелке. Электрический ток, который протекал в магнитных жгутах, образовавших эти пятна, также был направлен в одну сторону. Произошло взаимное притяжение магнитных трубок, что привело к взаимному уничтожению азимутального магнитного поля (рис. 2), что в свою очередь привело к возникновению нестационарных процессов – вспышки балла X3.4, произошедшей 13 декабря 2006 г.

Подводя итоги, можно сказать, что пятна АО 10930 могут и не представлять биполярную пару, которая имеет одну историю появления на поверхности и следует закону полярностей Хейла. Большое пятно отрицательной полярности появилось раньше, перед выходом АО из-за лимба, как простая α -конфигурация со слабой закрученностью магнитной трубки ($\varphi/l = 3.8 \cdot 10^{-3^\circ}/\text{км}$). Малое пятно положительной полярности появилось позже, как другая α -конфигурация с большей закрученностью ($\varphi/l = 2.4 \cdot 10^{-2^\circ}/\text{км}$). Близкое взаимодействие между этими пятнами, образованными магнитными трубками, в которых протекал ток одного знака, привело к вспышке балла X3.4.

Hinode – японская миссия, развитая и начатая ISAS/JAXA в сотрудничестве с NOAJ и с международными партнерами NASA и STFC (UK). Автор благодарен команде *Hinode/SOT* за возможность свободно использовать данные инструменты.

Литература

- Альвен Г., Фельтмахер К.-Г. // *Космическая электродинамика*. М.: Мир. 1967.
- Браун и др. (Brown D.S. et al.) // *Solar Phys.* 2001. V. 201. P. 305.
- Браун и др. (Brown B.N. et al.) // *Solar Phys.* 2003. V. 216. N. 1–2. P. 79.
- Голд, Хоул (Gold T., Hoyle F.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1960. V. 120. N. 2. P. 7.
- Гопасюк С.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1965. Т. 33. С. 100.
- Гопасюк С.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1981. Т. 64. С. 108.
- Гопасюк (Gopasyuk S.I.) // *Sun and Planetary System / Eds Fricke W., Teleki G. Dordrecht: D. Reidel Publ. Co.* 1982. P. 125.
- Гопасюк С.И., Гопасюк О.С. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1998. Т. 14. N. 5. С. 389.
- Гопасюк, Гопасюк (Gopasyuk S.I., Gopasyuk O.S.) // *Solar Phys.* 2005. V. 231. Issue 1–2. P. 11.
- Гопасюк С.И., Лазарева Л.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1986. Т. 74. С. 84.
- Гопасюк, Косовичев (Gopasyuk O.S., Kosovichev A.G.) // *Astrophys. J.* 2011. V. 729. Issue 2. article id. 95. P. 1.
- Жанг и др. (Zhang J., Li L., Song Q.) // *Astrophys. J.* 2007. V. 662. L. 35.
- Зирин, Танака (Zirin H., Tanaka K.) // *Solar Phys.* 1973. V. 32. Issue 1. P. 173.
- Исобе и др. (Isobe H., Kubo M., Minoshima T., et al.) // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2007. V. 59. S. 807.
- Ичимото и др. (Ichimoto K., Lites B., Elmore D., et al.) // *Solar Phys.* 2008. V. 249. Issue 2. P. 233.
- Косуги и др. (Kosugi T., Matsuzaki K., Sakao T., et al.) // *Solar Phys.* 2007. V. 243. Issue 1. P. 3.
- Магара, Тсунета (Magara T., Tsuneta S.) // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2008. V. 60. N. 5. P. 1181.
- Малтби (Maltby P.) // *Astrophys. Norvegica.* 1964. V. 8. P. 205.
- Мин, Чэй (Min S., Chae J.) // *Solar Phys.* 2009. V. 258. Issue 2. P. 203.
- Найтингейл и др. (Nightingale et al.) // *Multi-Wavelength Observations of Coronal Structure and Dynamics. Yohkoh 10th Anniv. Meeting / Eds Martens P.C.H., Cauffman D. New York: Elsevier.* 2002. P. 149.
- Пикельнер С.Б. // *Основы космической электродинамики*. М.: Физматгиз. 1961.
- Су и др. (Su J.T., Sakurai T., Suematsu Y., et al.) // *Astrophys. J.* 2009. V. 697. L. 103.
- Суематсу и др. (Suematsu Y., Tsuneta S., Ichimoto K., et al.) // *Solar Phys.* 2008. V. 249. Issue 2. P. 197.
- Тсунета и др. (Tsuneta S., Ichimoto K., Katsukawa Y., et al.) // *Solar Phys.* 2008. V. 249. Issue 2. P. 167.
- Хагъярд и др. (Hagyard M. J., Teuber D., West E. A., et al.) // *Solar Phys.* 1984. V. 91. P. 115.
- Эвершед (Evershed J.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1910. V. 70. P. 217.
- Ян, Ку (Yan X.L., Qu Z.Q.) // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 468. Issue 3. P. 1083.
- Ян и др. (Yan X.-L., Qu Z.-Q., Kong D.-F.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2008. V. 391. Issue 4. P. 1887.