

ПОЛЯРНЫЕ ПЕРЬЯ И ГЛОБАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА

Polar Plumes and the Solar Global Magnetic Field

Abstract. Tangents to polar plumes in each solar hemisphere cross at nearly the same point, which may be called a magnetic focus. Geometry of polar plumes reflected by the magnetic focus position demonstrates global magnetic field variations, especially polarity reversals. The temporal behavior of the magnetic focuses over the 23rd cycle, derived from the SOHO EIT daily observations, differs appreciably from that inferred from isolated observations during eclipses. A simple model, which represents the global field using the third and seventh harmonics, can reproduce quite satisfactorily the observed dynamics of magnetic focuses of the polar field.

Полярные перья, или щётки, системы тонких лучей в полярных областях солнечной короны, отражают эволюцию глобального магнитного поля Солнца. Геометрическая форма отдельных лучей и их общее распределение могут дать ценные сведения о полярном магнитном поле, информация о котором весьма скудна даже для фотосферного уровня, поскольку магнитографические измерения вблизи лимба затруднены, а приполярные области всегда расположены у лимба, вследствие ориентации оси вращения Солнца почти перпендикулярно плоскости эклиптики. Общий вид полярной короны еще в 19 веке наводил на мысль о наличии у Солнца магнитного поля. Впоследствии картина полярных перьев не раз сопоставлялась с силовыми линиями диполя и находилось удовлетворительное соответствие. Более тщательный анализ геометрии лучей привёл к аналогии с полосовым магнитом или длинным соленоидом внутри Солнца, поскольку продолжения полярных лучей на диске Солнца (рис. 1), точнее касательные к ним у лимба, пересекаются вблизи двух точек, которые можно назвать "монополярными концами соленоида или "магнитными фокусами". Расстояние q от центра диска до магнитного фокуса F , как оказалось, меняется в ходе солнечного цикла (рис. 2).

Как известно, глобальное магнитное поле Солнца в нижней и средней короне неплохо описывается потенциальным приближением. Осесимметричные сферические функции, обычно применяемые для разложения глобального поля, обладают таким свойством, что касательные к силовым линиям поля при малых углах от оси, пересекаются в одной точке, причём чем выше степень n функции, тем дальше от центра сферы располагается фокус (Ермаков Ф.А. и др., АЖ, 1995, **72**, 753).

$$q^{(n)} = R_{\odot} \frac{n}{n+2}. \quad (1)$$

Гармонический анализ магнитного поля на всей поверхности фотосферы свидетельствует, что в годы минимальной активности в разложении по сферическим функциям доминируют низкие гармоники, а в годы максимума – высокие гармоники (Bravo S. et al., Solar Phys., 1998, **179**, 223), то есть согласно (1) в минимуме q должно быть

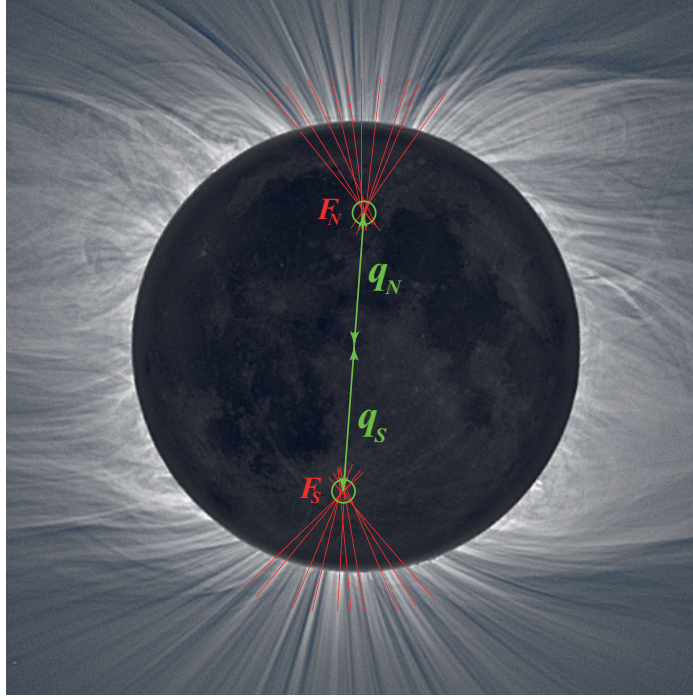


Рис. 1: Изображение солнечной короны во время затмения 22 июля 2009 г. (Druckmüller M. et al., <http://www.zam.fme.vutbr.cz/druck/Eclipse>) с обозначенными магнитными фокусами.

$\sim 0.3 - 0.6$, а в максимуме >0.7 , что противоречит рис. 2. Однако особенность эволюции глобального магнитного поля состоит в том, что во время максимума в полярных областях происходит переполюсовка, причём таким образом, что область старого поля сжимается к оси вращения и вытесняется полем другого знака. На языке мультиполей это означает, что высокие гармоники старого цикла проявляются в полярном поле с тем же весом, что и низкие гармоники нового цикла.

Для поля, описываемого суммой двух гармоник n и m , выражение для q имеет вид (Филиппов Б.П. и др., АЖ, 2004, **81**, 859)

$$q^{(n+m)} = R_{\odot} \frac{n}{n+2} \left(1 + \frac{\frac{m(n+2)}{n(m+2)} - 1}{\frac{(n+1)(n+2)}{C(m+1)(m+2)} + 1} \right), \quad (2)$$

где C – отношение амплитуд гармоник. Задав простую модель глобального поля, состоящую из третьей и седьмой гармоник

$$g_3(t) = \cos \omega t .$$

$$g_7(t) = C_0 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

где C_0 – отношение амплитуд гармоник в минимуме активности, ω – частота полного магнитного цикла, $t = 0$ соответствует минимуму, получим зависимость, показанную на рис. 3. Как видно, вблизи максимума могут достигаться низкие значения q , но эта зависимость совсем не похожа на синусоидальную кривую рис. 2.

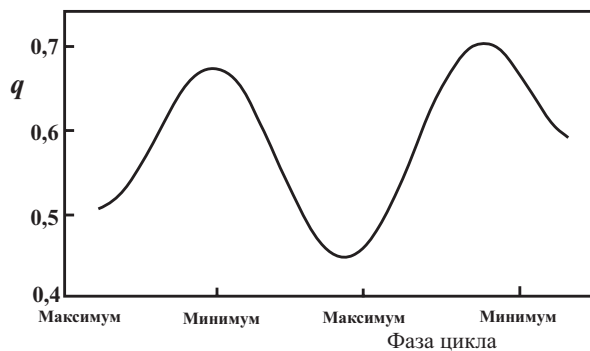


Рис. 2: Зависимость положения фокусов от фазы цикла за полный магнитный период 22 года (по данным Макаров V.I., 1998, ASP Conf. Ser. **140**, 83).

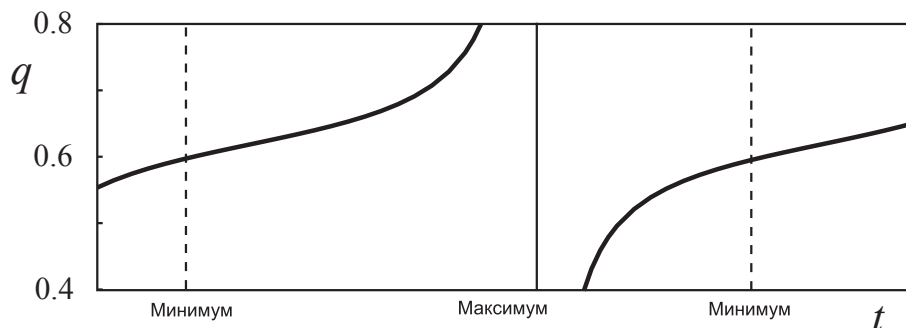


Рис. 3: Зависимость положения фокусов от времени в модели (3) при $C_0 = 0,1$.

Для уточнения характера перемещения фокусов в цикле Клепиков и др. (АЖ, 2006, **83**, 932) проследили поведение магнитных фокусов полярного поля Солнца в течение 23 цикла активности по материалам ежедневных наблюдений солнечной короны телескопом EIT спутника SOHO в линиях FeIX/X 171 Å (рис. 4). Как оказалось, поведение фокусов в цикле заметно отличается от того, что было известно из отрывочных затменных наблюдений. Вблизи максимума активности во время переполюсовки действительно происходит резкий скачок значений q , так что модельная зависимость на рис. 3 неплохо соответствует экспериментальной кривой на рис. 4.

Такая динамика магнитных фокусов связана, вероятно, с особенностями переполюсовки на Солнце. Дело в том, что переполюсовка – это не полное исчезновение поля на Солнце и появление нового с противоположным направлением, а вытеснение старого поля новым от умеренных широт к полюсам. В короне над полюсом в какой-то момент возникает нулевая точка магнитного поля (рис. 5). Куполообразная сепаратрисная поверхность, проходящая через нулевую точку, отделяет старое поле внутри от нового снаружи. Старое поле ослабевает и сжимается. Момент переполюсовки знаменуется кажущимся опусканием нулевой точки магнитного поля под фотосферу.

Таким образом, синтетическая зависимость положения фокусов от фазы цикла, составленная по разрозненным наблюдениям короны во время затмений в различные циклы, оказалась не вполне достоверной. Она не отражает действительных изменений

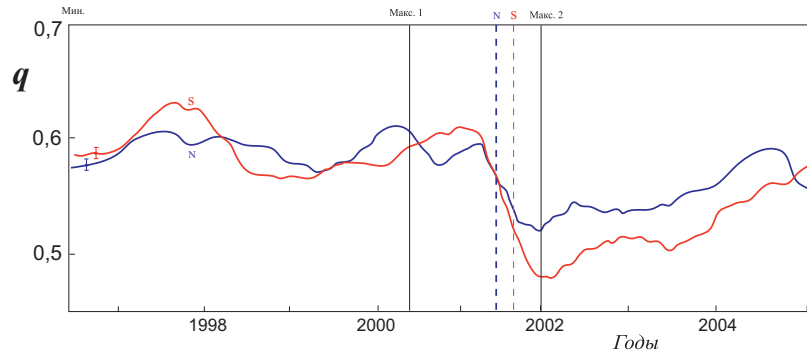


Рис. 4: Зависимость положения фокусов в северном (синяя кривая) и южном (красная кривая) полушарии от времени в 23 цикле (по данным Клепикова Д.В. и др., АЖ, 2006, **83**, 932). Вертикальные сплошные линии показывают время двух пиков числа пятен в максимуме цикла, пунктирные линии соответствуют моментам переполюсовки в северном и южном полушарии.

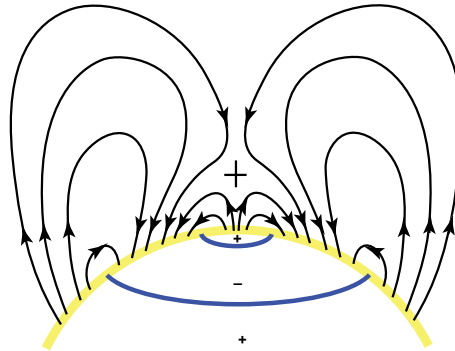


Рис. 5: Схематическая структура силовых линий глобального магнитного поля в полярной области вблизи момента переполюсовки.

геометрии корональных лучей во время переполюсовки, которые, вероятно, связаны с прохождением специфических седловых структур глобального магнитного поля Солнца через полярные области. Интерпретация движения фокусов в течение цикла указывает на то, что крупномасштабная часть глобального поля опережает мелкомасштабную на половину цикла.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 12-02-00008, 12-02-92692), а также Программы № 22 Президиума РАН.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова,
Москва, Троицк,
Калужское шоссе, 4,
142190, Россия
bfilip@izmiran.ru

Поступила в редакцию 18 января 2013 г.

Б.П.Филиппов
В.Р.Filiprov
О.Е.Ден
O.E.Den
О.В.Марценюк
O.V.Martsenyuk
Е.И.Гамза
E.I.Gamza