ПЕРЕСТРОЙКА ТОКОВОЙ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКА ПОЛЯРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА В МИНИМУМЕ 23/24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

Мерзляков В.Л.¹, Баранов Д.Г.², Вернова Е.С.³

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

³*Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия*

CURRENT STRUCTURE OF THE POLAR SOURCE OF THE SUN'S MAGNETIC FIELD IS RECONSTRUCTED IN 23/24 SOLAR CYCLES MINIMUM

Merzlyakov V.L.¹, Baranov D.G.², Vernova E.S.³

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS,
Moscow, Troitsk, Russia*

²*A.F. Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia*

³*IZMIRAN, St. Petersburg Filial, St. Petersburg, Russia*

Some properties of the polar magnetic source in 2008 minimum are investigated. It was established that the evolution of magnetic properties are differed from the situations in 1986 and 1996 solar minima. This difference is explained by current latitude unhomogeneous of the polar source. The calculations show that such unhomogeneous is increased during the decreasing activity solar cycle 23 and is stabilized in increasing phase of solar cycle 24.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-199-202

Введение

На спаде 23 солнечного цикла наблюдалось уменьшение магнитного потока Солнца. Это привело к 2-х кратному понижению напряжённости полярного магнитного в минимуме 23/24 циклов [1] и значительному уменьшению мощности 24 солнечного цикла. Такие пониженные магнитные свойства 24 солнечного цикла указывают на перестройку условий генерации магнитного поля Солнца. Проведём анализ некоторых свойств такой перестройки в минимуме 23/24 солнечных циклов.

Свойства полярного поля

В минимуме солнечной активности в полярной зоне Солнца наблюдаются полярные перья. Эти перья являются структурными образованиями К-короны, которые проявляется во время полных солнечных затмений. На рис. 1 приведена такая структура короны затмения 2008 года. Геометрия полярных перьев показывает, что они расходятся в виде пучка из компактной области, находящейся на оси вращения Солнца. Положение этой ком-

пактной области не случайное, а имеет зависимость от фазы солнечного цикла [2].

Рис. 1.

Рис. 2.

Считается, что полярные перья трассируют магнитные силовые линии. В таком случае, область пересечения оснований перьев можно рассматривать как магнитный «заряд». И магнитное поле, соответственно, аппроксимируется радиально направленным магнитным полем B_r , расходящимся от «заряда» q :

$$B_r = q/r^2. \quad (1)$$

Чтобы изучаемый источник описывался как «заряд», требуется зависимость от расстояния r именно как квадратичная (1). Судить об этом по геометрии полярных перьев не представляется возможным. Необходимо иметь магнитные измерения. И таковые имеются, хорошее качество измерению предоставляет магнитограф обсерватории Kitt Peak. Эти данные есть за три минимума солнечной активности 1986 г., 1996 г., 2008 г.

По имеющимся данным за три эпохи минимума моделировалось широтное распределение магнитного поля в предположении действия «заряда» (1). Изучалась полярная зона в пределах до 70° широты, где измерения магнитного поля достаточно надежные. В результате моделирования были получены положения магнитного «заряда» относительно солнечного центра L_q от фазы солнечного цикла, которые изображены на рис. 2 в виде кривых с отметками эпох минимумов. Черные квадраты показывают положение «заряда» по местам пересечения оснований полярных перьев (рис. 2). По полярным перьям использовались данные работ [3, 4] солнечных корон с 1871 г. по 2009 г. Положение «заряда» L_q дано в единицах солнечного радиуса R_s .

Как видно на рис. 2, имеется хорошее согласие (в пределах $\pm 0.02 R_s$) между положением L_q по магнитным полям и полярным перьям в интервале фазы солнечного цикла от -0.2 до +0.1 (отрицательная фаза соответствует ветви спада солнечного цикла). Тем самым, можно утверждать, что в минимуме солнечной активности источник полярного магнитного поля можно аппроксимировать магнитным «зарядом». Но этот вывод справедлив только для минимумов 1986 г. и 1996 г. В минимуме 2008 г. наблюда-

ется существенное отличие от ситуации с предыдущими эпохами минимумов (пунктирная кривая на рис. 2). При этом геометрия полярных перьев по структурам корон 2008 г. (рис. 1) и 2009 г. укладывается в общую тенденцию рис. 2 (черные квадраты).

Модельные расчеты

Рассмотрим возможную причину отличия ситуации в 2008 г. от двух предшествующих минимумов (рис. 2). В полярной зоне короны 2008 г. (фаза цикла -0.04) пересечения оснований полярных перьев происходит на расстоянии $0.65 R_s$ (рис. 1). Это означает, что токовая система имеет схожие свойства с ситуацией с 1986 г. и 1996 г. по геометрии. Поскольку положение «заряда» L_q определяет широтную протяжённость этой системы. И положение «заряда» 2008 г. указывает на неизменность такой протяженности и в этом минимуме. Тогда, наблюдаемое отличие (рис. 2), вероятно, обусловлено тем, что плотность тока такой системы имеет существенную широтную неоднородность.

На спаде активности в солнечном цикле процесс генерации перемещается к экватору, поэтому наиболее существенная неоднородность должна происходить именно в экваториальной области. Такую неоднородность можно описать дискретным образом как систему двух соленоидов. В виде основной соленоидальной системы токов и дополнительной в экваториальной области. Эти две соленоидальные системы токов создают на фотосфере магнитное поле, проекция которого на луч зрения имеет вид:

$$B_l = q_1 \cos(\varphi) \cdot R_s / \rho_1^3 + q_2 \cos(\varphi) \cdot R_s / \rho_2^3, \quad (2)$$

где расстояние от «заряда» $\rho = (R_s^2 + L_q^2 - 2R_s L_q \cdot \cos(\varphi))^{1/2}$, φ – гелиоширота места наблюдения магнитного поля.

Широтная протяжённость основной системы токов 2008 г. (q_1) считаем аналогичной ситуации минимума 1986 г. (рис. 2). На это указывает геометрия полярных перьев короны 2008 г. (рис. 1) и совпадение с зависимостью L_q минимума 1986 г. до фазы -0.35 (рис. 2). Такое предположение позволяет рассчитать расстояние ρ_1 в изучаемую эпоху минимума. Дополнительная токовая система (q_2) находится около экватора и расстояние от дополнительного «заряда» до фотосферы можно считать $\rho_2 \approx R_s$.

На основе принятых предположений мы можем определить величины «зарядов» q_1 и q_2 по измеренным компонентам фотосферного магнитного поля B_l (2). Используем две широтные полосы $50^\circ - 60^\circ$ и $60^\circ - 70^\circ$, где получаем среднее значение проекции магнитного поля B_l . Из отношения величин этих проекций находим величину q_2/q_1 .

Оказалось, что основные изменения в токовой системе полярного источника произошли на спаде 23 солнечного цикла. Так, доля экваториального тока увеличилась почти в 3 раза в пределах фазы -0.2 – 0, с $q_2/q_1 = 1.0$ до 2.75. А в начале роста 24 солнечного цикла изменение отношения q_2/q_1

практически прекратилось. От начала цикла до фазы +0.1 увеличение q_2/q_1 составило менее 2%. Следует отметить, знак «заряда» q_2 совпадает с q_1 , т.е. направление токов имеет одинаковое направление. В итоге происходит увеличение плотности приэкваториального тока.

Выводы

Источник полярного магнитного поля в минимумах солнечной активности представляет собой систему круговых токов типа соленоид. В минимумах 1986 г. и 1996 г. плотность токов по широте является равномерной. В минимуме 2008 г., вероятно, происходит перераспределение токов по широте. Расчёты показали, что имеет место усиление плотности тока в экваториальной области. На спаде активности 23 солнечного цикла произошло относительное усиление приэкваториального тока в ≈ 3 раза. На фазе роста активности 24 солнечного цикла увеличение плотности тока также отмечалось, но по темпам в $\approx 10^2$ раз меньшим. Таким образом, можно утверждать, что на спаде 23 цикла происходила значительная перестройка токовой системы полярного источника. А с началом 24 цикла ситуация в токовой системе практически стабилизировалась.

Литература

1. <http://wso.stanford.edu/gifs/Polar.gif>.
2. Saito K. // Pub. Astron. Soc. Japan. 1965. V. 17. No 4. pp. 421–426.
3. Несмянович А.Т. // Астрон. Журнал. 1962. Т. 39. № 6. с. 996–1002.
4. Мордвинов А.В., Язев С.А., Рыкова Е.Г., Дворкина-Самарская А.А. // Солнечно-земная Физика. 2011. Вып. 18. с. 69–73.