ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОРОНЫ СОЛНЦА

Мерзляков В.Л., Старкова Л.И.

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

EVOLUTION CHANGES OF MAGNETIC FIELD STRUCTURE OF SOLAR CORONA

Merzlyakov V.L., Starkova L.I.

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

The variations of coronal magnetic configuration were investigated. The coronal helmet curvature is used as an indicator of magnetic configuration. It has been established that during solar activity minima steady variations of magnetic structure existed. At the beginning of new solar cycle rapid reconstruction of coronal magnetic field took place. Also there are helmet curvature changes with local maximum 0.9 year before and 0.9 year after moment of solar minimum activity. These local extrema are likely to be a result of evolution of magnetic field generation.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-287-290

Введение

Механизм генерации переменного магнитного поля Солнца остается ещё окончательно не проработанным. Причиной тому, в частности, является отсутствие надежных данных о закономерностях перестроек магнитных полей в солнечной атмосфере. Непосредственные измерения магнитных полей производятся на фотосферном уровне, и регулярный ряд таких измерений охватывает около 5 солнечных циклов, что не позволяет надежно выделить закономерные вариации на фоне различного рода флуктуаций. Поэтому приходится изучать проявления магнитной активности по косвенным индексам. Наиболее известный и широко используемый индекс – число Вольфа, основанный на наблюдаемом количестве фотосферных пятен. В эпохи низкой активности Солнца пятен мало, что делает число Вольфа ненадежным для поиска закономерностей магнитных вариаций. В связи с этим, для эпохи низкой солнечной активности авторы предлагают провести поиск закономерностей по изменению геометрии корональных шлемов. Этот подход представляется обоснованным, поскольку наблюдаемая шлемовидная структура, как установлено, зависит от магнитной активности Солнца.

Кривизна корональных шлемов

В качестве анализируемого геометрического параметра шлема была выбрана его кривизна. Эффект кривизны проявляется в отклонении оси шлема от радиального направления. Исследование [1] показало, что величина такого отклонения зависит от фазы солнечного цикла, т.е. от солнечной активности. На рис. 1 приведено изображение К-короны, полученное во время полного солнечного затмения 1889 г. Оси 4-х шлемов на рис. 1 отмечены точками как средняя широта между границами. Проведена радиальная линия в основание одного из шлемов (рис. 1), которое демонстрирует отклонение оси шлема от радиальности, и это отклонение растет с расстоянием от центра Солнца. Наилучшей аппроксимацией зависимости широты оси (φ) от расстояния (r) оказалась степенная функция вида $\varphi = \varphi_0 r^n$, где φ_0 широтное положение шлема на лимбе. В принятой аппроксимации показатель n является числовой характеристикой кривизны шлема.

Рис. 1.

Рис. 2.

Расчеты кривизны оси шлемов были проведены по изображениям К-корон, полученных во время полных солнечных затмений с конца XIX века. Анализ показателя n выявил зависимость его величины как от фазы солнечного цикла, так и широтного положения шлема. На рис. 2 приведены расчетные данные величины n от широтного положения шлема (φ_0). По данным, относящимся к одной короне, проводили линейную аппроксимацию $n = n_0 + k\varphi_0$. На рис. 2 аппроксимации сплошными линиями относятся к коронам в периоды роста солнечной активности, а пунктирные линии соответствуют эпохам спада. Оказалось, что на спаде и росте солнечной активности изменение кривизны оси шлемов с широтой $dn/d\varphi_0$ имеет разные знаки (рис. 2).

Зависимость кривизны от фазы цикла

Имея широтную зависимость $n(\varphi_0)$ рис. 2, возможно получить картину изменения кривизны шлемов именно от степени солнечной активности. На рис. 3 приведены результаты расчетов $n(\varphi_0)$ в виде квадратов и кружков по каждой найденной линейной аппроксимации (рис. 2) для трех широт 10° ,

30°, 50°. Эти значения поставлены около аппроксимирующих расчетные данные кривых. Степень активности Солнца на моменты регистрации К-корон представили фазой цикла, рассчитанной стандартным способом. Таким образом, нами получена общая картина изменения кривизны шлемов $n(\varphi_0, \text{фаза})$ от их широты и фазы солнечного цикла (рис. 3).

Рис. 3.

Рис. 4.

Как видно на рис. 3, изменение величины $n(\varphi_0, \text{фаза})$ демонстрирует эволюционные тенденции в солнечном цикле. Во-первых, около нулевой фазы (граница между солнечными циклами) происходит скачок не только величины n , но и меняется знак широтного градиента $dn/d\varphi_0$. Во-вторых, имеются локальные экстремумы величины n около фаз -0.13 и $+0.22$, которые отстоят от границы между циклами в среднем на 0.85 года.

Найденные изменения кривизны рис. 3 отражают усредненную тенденцию по многим солнечным циклам. Между тем, остается неопределенной ситуация с временной стабильностью моментов появления скачка n и экстремумов (рис. 3). Проясним эту ситуацию по материалам регулярных наблюдений коронометра “Mark”. Рис. 4 воспроизводит величину отклонения $\Delta\theta$ от радиальности оси шлемов от экватора до средних широт согласно [2]. Как видно на рис. 4 есть флуктуации $\Delta\theta$, но на их фоне четко прослеживается система пиков в эпохи минимумов. Так начало самого большого из них приходится на моменты минимумов 21/22 (1986.8 г.) и 22/23 (1996.9 г.) солнечных циклов. В нашем случае скачок показателя n (рис. 3) как раз приходится на минимум активности, а его уменьшение означает увеличение кривизны шлемов, и, как следствие, появление пика в отклонении $\Delta\theta$ (рис. 4). Уменьшение n до минимума на фазе -0.13 (рис. 3) также должно приводить к пику в отклонении $\Delta\theta$, и такие пики, предшествующие минимуму активности, имеются (рис. 4). Они опережают минимумы 21/22 и 22/23 соответственно на 0.8 г. и 1.1 г. (рис. 4), т.е. имеем временной интервал 0.95 ± 0.15 г., в который попадает оценка 0.85 г. по данным рис. 3. Тем самым можно говорить об относительной стабильности наступления смены тенденции в перестройке коронального магнитного поля на спаде активности (рис. 3). Заметим, что и на спаде 23 цикла тоже

имеются пики (рис. 4), но получить точную картину по материалам [2] не получается из-за их ограниченности 2008 годом.

Локальный минимум кривизны κ в начале солнечного цикла рис. 3 означает появление минимума в отклонении от радиальности $\Delta\theta$. И такой минимум имеет место после пика на границе циклов (рис. 4). Моменты его наступления отстоят от рассматриваемых минимумов активности 21/22 и 22/23 циклов соответственно на 0.7 г. и 1.0 г. (рис. 4). Получаем, что момент перестройки коронального магнитного поля в начале солнечного цикла происходит спустя 0.85 г. $\pm$ 0.15 г., в который попадает оценка по усредненной картине рис. 3. Этот факт означает, что и момент смены тенденции в перестройке коронального магнитного поля в начале солнечного цикла (рис. 3) есть стабильно повторяющийся феномен.

Выводы

Анализ кривизны оси корональных шлемов выявил устойчивую картину её изменения в цикле солнечной активности. На границе между циклами происходит её скачкообразное увеличение. На спаде солнечной активности и росте кривизна достигает локального экстремума. Моменты наступления экстремумов отстоят от границы между циклами на 0.9 г. с небольшим временным разбросом.

Скачок кривизны (рис. 3), очевидно, связан с широтным перемещением зоны выхода магнитного потока от приэкваториальной области к среднеширотной в начале нового цикла. Изменение кривизны с наличием экстремумов, по-видимому, обусловлено какими-то структурными перестройками процесса генерации. Поскольку каких-либо закономерностей в вариациях величины фотосферного магнитного потока в моменты рассмотренных экстремумов эпох 21/22 и 22/23 циклов согласно данным магнитографических измерений NSO [3] не происходило.

Литература

1. Loucif M.L., Koutchmy S. // Astron. Astrophys. Suppl., 1989, v. 77, p. 45-66.
2. Tlatov A.G. // Astrophys. J., 2010, v. 714, p. 805-809.
3. <https://www.nso.edu/data/historical-archive/>