

Д.В. Ерофеев

МЕЖПЛАНЕТНОЕ ПОЛЕ И МАГНИТНАЯ АСИММЕТРИЯ СОЛНЦА

ВВЕДЕНИЕ

При исследованиях межпланетного магнитного поля (ММП), наблюдаемого вблизи орбиты Земли, обнаружено явление длительного (более одного оборота Солнца) преобладания магнитного поля одной полярности (см. [2]). Такое же "квазимонопольное" поведение обнаруживает и магнитное поле Солнца, наблюдаемого как звезда, или общее магнитное поле (ОМП) [2,4,5]. Преобладающие знаки ММП и ОМП содержат составляющие двух типов, имеющие разное происхождение. Во-первых, это сезонная составляющая, по всей видимости связанная с изменением в течение года наклона оси вращения Солнца к линии, соединяющей центр Солнца и точку наблюдения. Своим существованием сезонная составляющая обязана, главным образом, "квазидипольной", т.е. нечетной относительно экватора, компоненте магнитного поля Солнца. Вторая составляющая ММП (и ОМП), которая изменяется с характерными периодами больше 1 года, не может быть объяснена сезонным эффектом. Предположительно она вызвана магнитной асимметрией Солнца, т.е. вкладом сравнительно слабой, четной относительно экватора компоненты солнечного магнитного поля [2,4,5]. Имеющиеся в настоящее время данные позволяют сравнить поведение всех трех компонент вектора ММП с поведением пространственных гармоник магнитного поля Солнца.

При усреднении ММП за один или несколько оборотов Солнца вклад от неосесимметричных составляющих солнечного магнитного поля исчезает, и такой усредненный по времени (сглаженный) сигнал определяется осесимметричными, или зональными, гармониками фотосферного магнитного поля. Представим солнечное зональ-

ное магнитное поле H в виде разложения по полиномам Лежандра P_n :

$$H(f, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n(t) P_n(f), \quad (1)$$

где t – время, f – гелиографическая широта, а c_n – соответствующие коэффициенты разложения. Тогда, согласно хорошо известной модели "поверхности источника", сглаженные по времени радиальную B_r и азимутальную B_φ компоненты вектора ММП можно формально выразить в виде ряда

$$B_i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n(t) Q_n, \quad (2)$$

где C_n – сглаженные значения коэффициентов разложения фотосферного магнитного поля, а Q_n – результат интегрирования полиномов Лежандра с соответствующими весовыми функциями, которые убывают с увеличением $|f|$. Следует заметить, что ввиду сезонного эффекта – изменения в течение года гелиографической широты места наблюдения, – величины Q_n являются функциями времени. Однако при сглаживании значений ММП с временным окном, равным году (как мы и будем поступать), сезонный эффект исчезает. При этом все Q_n с нечетными номерами n оказываются равными нулю, а Q_n с четными номерами, вообще говоря, не равны нулю из-за того, что при интегрировании с весовой функцией вклад от магнитного поля низкоширотной зоны оказывается несбалансированным вкладом высокоширотных областей Солнца. Очевидно, что величины Q_n должны довольно быстро убывать по абсолютной величине с ростом n , ввиду уменьшения пространственного масштаба фотосферного магнитного поля, и можно ожидать, что поведение сглаженных значений ММП определяется, главным образом, поведением квадрупольной ($n=2$) гармоники магнитного поля Солнца.

Несмотря на то, что физический механизм формирования сигнала ОМП не имеет ничего общего с механизмом формирования ММП, их формальное математическое описание оказывается практически одинаковым, в силу чего и имеет место тесная взаимная

корреляция этих величин [6]. В частности, сглаженный за год сигнал ОМП (далее обозначаемый $M(t)$) связан с амплитудами гармоник фотосферного поля соотношением, аналогичным уравнению (2).

ДААННЫЕ

Коэффициенты разложения C_n за 1967–2001 гг. рассчитаны по оцифрованным синоптическим картам фотосферного магнитного поля, полученным на обсерваториях Маунт Вилсон, Китт Пик и Стэнфорд, причем карты разных обсерваторий были приведены в единую систему напряженностей магнитного поля (более подробно данные и процедура их обработки описаны в [1]). Кроме того, нами использовался ряд измерений общего магнитного поля Солнца, полученный в Стэнфорде в период 1975–2000 гг.

Данные о межпланетном магнитном поле, полученные на искусственных спутниках Земли, взяты из каталога [7]. Среднесуточные значения компонент вектора ММП, приведенные в каталоге в геоцентрической системе координат GSE, были пересчитаны в гелиоцентрическую сферическую систему координат и затем усреднены за год. Таким образом, мы получили среднегодовые значения радиальной B_r , азимутальной B_ϕ и меридиональной B_θ компонент ММП за 1967–2001 гг. Компоненты B_r и B_ϕ описывают, главным образом, регулярную структуру ММП в виде "паркерской спирали", и поэтому они тесно коррелируют друг с другом: коэффициент корреляции для их среднегодовых значений равен -0,82. Среднегодовые значения компоненты B_θ сравнительно малы и не коррелируют со значениями двух других компонент ММП. Вероятно, B_θ связана с различного рода возмущениями солнечного ветра и межпланетного поля.

Кроме описанных выше прямых измерений магнитных полей, мы используем данные о магнитном поле Солнца и ММП, полученные косвенными методами, но охватывающие значительно больший интервал времени. Благодаря любезности В.И Макарова и его сотрудников, в распоряжении автора настоящей работы оказались коэффициенты разложения C_n фотосферного магнитного поля, рассчитанные по синоптическим H_α картам за период с 1913 по 2001 г. Эти

коэффициенты – относительные, поскольку H_α карты позволяют определить только полярность, но не напряженность магнитного поля на поверхности Солнца. Косвенные данные о ММП за 1926–1971 гг. представлены хорошо известным каталогом Свалгарда (он взят из [3]), который дает на каждый день полярность межпланетного магнитного поля, определенную по характеристикам геомагнитных вариаций. По данным этого каталога были определены среднегодовые значения избыточной полярности ММП:

$$S = \frac{N_+ - N_-}{N}, \quad (3)$$

где N_+ и N_- – числа дней в году с положительной и отрицательной полярностью ММП, N – полное число дней года, охваченных наблюдениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как следует из сказанного выше, можно ожидать, что сигнал ОМП M и напряженности компонент ММП B_r , B_ϕ будут хорошо коррелировать с амплитудой C_2 квадрупольной гармоники фотосферного магнитного поля (которую для краткости будем называть "амплитудой квадруполь"). При этом нужно иметь в виду, что для ОМП и радиальной компоненты ММП ожидаемая корреляция отрицательна, поскольку их значения определяются, главным образом, напряженностью низкоширотного магнитного поля, а в C_2 она входит с отрицательным весом. Компонента ММП B_ϕ при обычном выборе направления отсчета азимутального угла отрицательно коррелирует с B_r , и поэтому следует ожидать положительной корреляции между ней и C_2 .

На рис.1 сопоставлены временные вариации ОМП и компонент ММП с вариацией амплитуды квадрупольной гармоники, а также соответствующие кросскорреляционные функции. Как и следовало ожидать, рис.1 демонстрирует несомненную связь поведения ОМП и ММП с поведением квадрупольной гармоники фотосферного магнитного поля. В табл.1 приведены коэффициенты корреляции между C_2 и

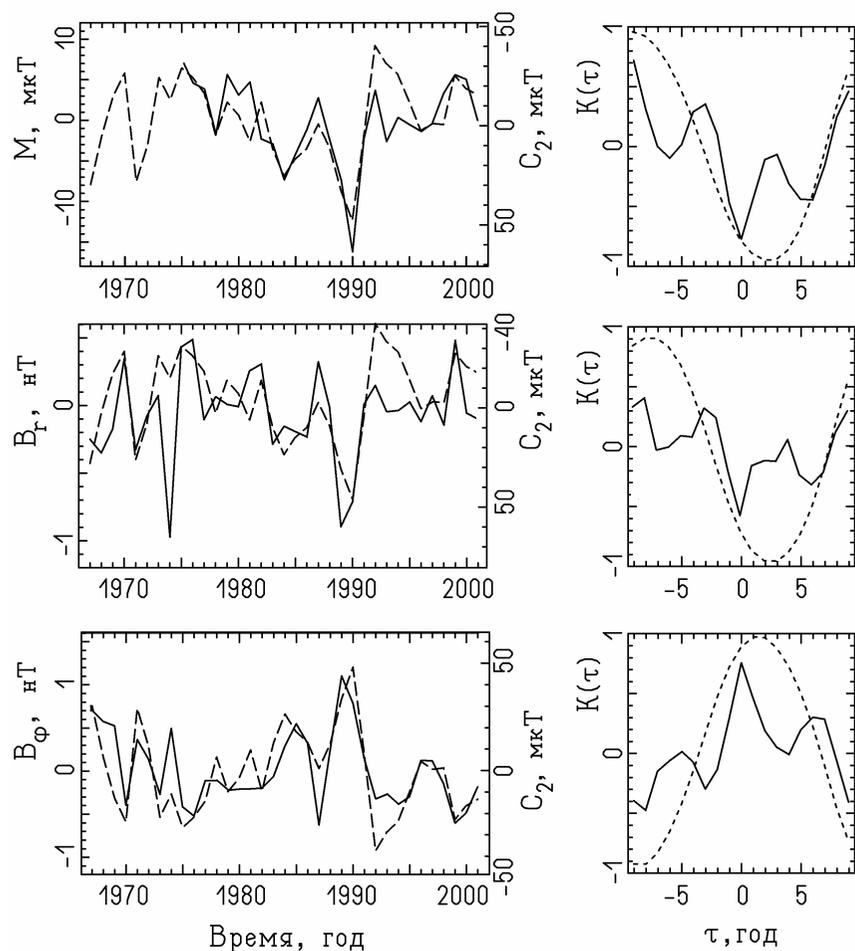


Рис.1. Слева – сравнение временного хода общего магнитного поля Солнца M , а также радиальной B_r и азимутальной B_ϕ компонент ММП (показаны сплошной линией) с эволюцией амплитуды квадрупольной гармоники фотосферного магнитного поля Солнца C_2 (показана штриховой линией). Все величины усреднены за год. Справа приведены соответствующие кросскорреляционные функции, причем штриховой линией отдельно показана взаимная корреляция низкочастотных составляющих сравниваемых временных рядов

исследуемыми временными рядами (в скобках указаны вероятные ошибки коэффициентов корреляции). Как можно видеть, для ОМП и азимутальной компоненты ММП B_ϕ коэффициенты корреляции с C_2 довольно велики и почти равны по модулю, тогда как для радиальной компоненты ММП корреляция оказывается заметно ниже. При этом знак корреляции во всех трех случаях соответствует ожидаемому. Слабая меридиональная компонента ММП B_θ , физическая природа которой не вполне ясна, не обнаруживает заметной корреляции с квадрупольной гармоникой солнечного магнитного поля, и далее эта компонента нами не рассматривается. При проведении корреляционного анализа с использованием относительных значений C_2 , полученных по H_α картам, результаты получаются по существу аналогичными описанным выше, однако коэффициенты корреляции оказываются немного меньшими по модулю (ср. числа во втором и третьем столбцах таблицы).

Коэффициенты корреляции между амплитудой квадрупольной гармоники фотосферного магнитного поля C_2 и измерениями общего и межпланетного магнитных полей

	Коэффициент корреляции	
	C_2 по прямым измерениям	C_2 по H_α картам
ОМП (Stanford, 1975–2000 гг.)	-0,77 ($\pm 0,08$)	-0,63 ($\pm 0,10$)
ММП B_r (1967–2001 гг.)	-0,57 ($\pm 0,11$)	-0,53 ($\pm 0,12$)
ММП B_ϕ (1967–2001 гг.)	+0,76 ($\pm 0,07$)	+0,67 ($\pm 0,08$)
ММП B_θ (1967–2001 гг.)	-0,09 ($\pm 0,17$)	-0,10 ($\pm 0,17$)
Знак ММП (1926–1971 гг.)	–	-0,53 ($\pm 0,10$)

Вполне вероятно, что кроме квадрупольной заметный вклад в ОМП и ММП дают высшие четные гармоники фотосферного магнитного поля. Теоретически величина этого вклада определяется коэффициентами Q_n в формуле (2), которые могут быть вычислены, исходя из соответствующих моделей. Однако модельные расчеты основаны на

не совсем точных приближениях, и было бы интересно определить значения Q_n непосредственно по экспериментальным данным. Мы нашли их методом наименьших квадратов, аппроксимируя ОМП и каждую из компонент ММП суммой вида (2), в которой, однако, учитывалось только три члена с четными номерами n . Как для ОМП, так и для обеих компонент ММП, найденные значения Q_4 и Q_6 в пределах погрешностей не отличаются от нуля. Таким образом, вклад высших ($n > 2$) четных гармоник фотосферного магнитного поля в измеренные значения ОМП и ММП находится на уровне шумов или ниже его. Заметим, что ОМП и ММП все же обнаруживают слабую корреляцию с некоторыми коэффициентами C_n при $n > 2$, однако эта связь, судя по всему, обусловлена не непосредственным вкладом соответствующих компонент солнечного магнитного поля в сигналы ОМП и ММП, а существованием слабой взаимной корреляции между C_2 и амплитудами высших четных гармоник фотосферного магнитного поля. Ниже приводятся регрессионные соотношения, связывающие среднегодовые значения ОМП и компонент ММП со значениями C_2 (здесь M и C_2 выражены в мкТ, в системе Стэнфорда, а компоненты ММП – в нТ):

$$M = -(0,191 \pm 0,032)C_2, \quad (4)$$

$$B_r = -(0,0093 \pm 0,0023)C_2, \quad (5)$$

$$B_\varphi = +(0,0157 \pm 0,0024)C_2. \quad (6)$$

При расчетах предполагалась возможность присутствия в соотношениях (4)-(6) постоянных членов, однако это члены оказались в пределах погрешностей не отличающимися от нуля.

На рис.2 показано сравнение вариаций избыточного знака ММП по данным Свалгарда с поведением коэффициента C_2 , рассчитанного по H_α картам. Сравнение этих данных позволяет заключить, что вариации избыточного знака ММП, полученные косвенным методом, существенно коррелируют с вариациями амплитуды солнечного квадруполья, и, таким образом, они отражают реальные вариации солнечного магнитного поля. Коэффициент корреляции между S и C_2 для периода 1926–1971 гг. равен $-(0,53 \pm 0,10)$, а для периода 1926–1948 гг., когда данные о ММП считаются наименее надежны-

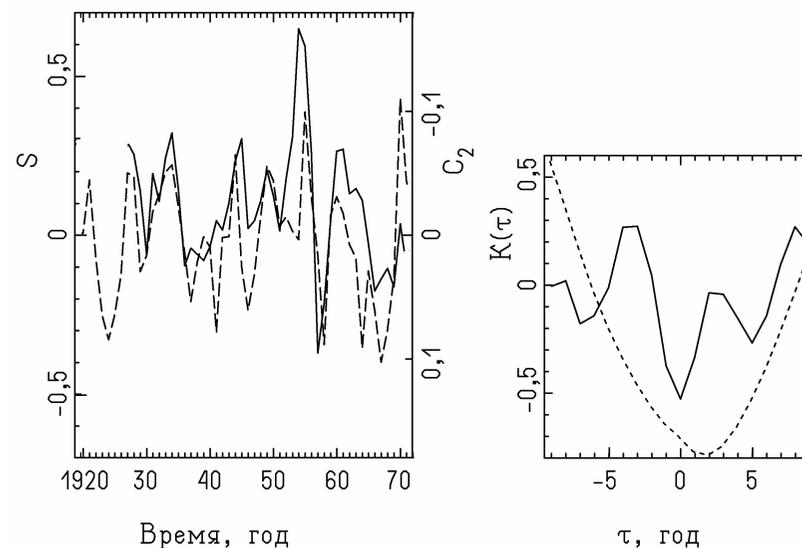


Рис.2. Слева – сравнение среднегодовых значений преобладающего знака ММП по данным Свалгарда (сплошная линия) и амплитуды квадрупольной гармоники солнечного магнитного поля C_2 , определенной по H_α картам (штриховая линия). Справа показана кросскорреляционная функция этих величин (сплошная линия) и их низкочастотных компонент (штрих)

ми, он получается даже большим по модулю и равным $-(0,64 \pm 0,12)$. Аппроксимация зависимости между S и C_2 линейной функцией дает соотношение

$$S = -(1,98 \pm 0,48)C_2 + (0,103 \pm 0,025), \quad (7)$$

где все величины безразмерные. Как можно видеть, в соотношении (7) присутствует постоянный член, величина которого статистически значимо отличается от нуля (отличие превышает 4 вероятные ошибки). Это говорит о том, что в данных Свалгарда, вероятно, присутствует систематическая ошибка, дающая приблизительно 10%-й избыток числа дней с положительной полярностью ММП.

Приведенные выше данные говорят о довольно хорошем согласии между поведением амплитуды солнечного квадрупольного компонента ММП, что свидетельствует в пользу простой линейной модели, описываемой уравнением (2). Наряду с тем имеют место и факты, которые этой простой моделью не описываются. Во-первых, кросс-корреляционные функции, показанные на рис.1 и рис.2, заметно асимметричны относительно $\tau = 0$, хотя их максимальные по модулю значения наблюдаются при нулевом взаимном сдвиге τ . Эта асимметрия связана с запаздыванием примерно на 2 года низкочастотного (22-летнего) колебания ММП относительно низкочастотной вариации C_2 , в то время как их более высокочастотные составляющие никакого взаимного сдвига во времени не обнаруживают. Реальность такого запаздывания, или фазового сдвига, подтверждается тем, что оно имеет место и в случае, когда для расчетов используются независимо определенные по N_α картам значения C_2 . Кроме того, на рис.1 можно видеть, что аналогичный фазовый сдвиг низкочастотной составляющей демонстрирует также сигнал ОМП, имеющий чисто солнечное происхождение. Последнее говорит о том, что обнаруженный фазовый сдвиг не вызывается какими-либо специфическими процессами, происходящими в солнечной короне или в межпланетном пространстве. Возможно, в обоих случаях, как ММП так и ОМП, фазовый сдвиг связан с влиянием локальных магнитных полей Солнца.

Второй факт, который трудно объяснить с точки зрения простой модели (2) – это то, что радиальная компонента ММП B_r хуже коррелирует с амплитудой солнечного квадрупольного компонента C_2 и вообще поведение этих компонент заметно различается. На рис.3 представлены спектры мощности компонент ММП B_r и B_ϕ в сравнении со спектрами солнечного квадрупольного компонента и ОМП. Спектры рассчитаны с помощью метода наложенных эпох по среднесуточным (а для C_2 по средним за 1 оборот) значениям сигналов и показаны в виде зависимостей квадрата амплитуды от частоты. Как можно видеть на рис.3, в обоих спектрах мощности солнечного магнитного поля (C_2 и ОМП) присутствуют две дискретные составляющие сравнимой амплитуды, имеющие периоды около 21 года и 6 лет. В более высокочастотной области

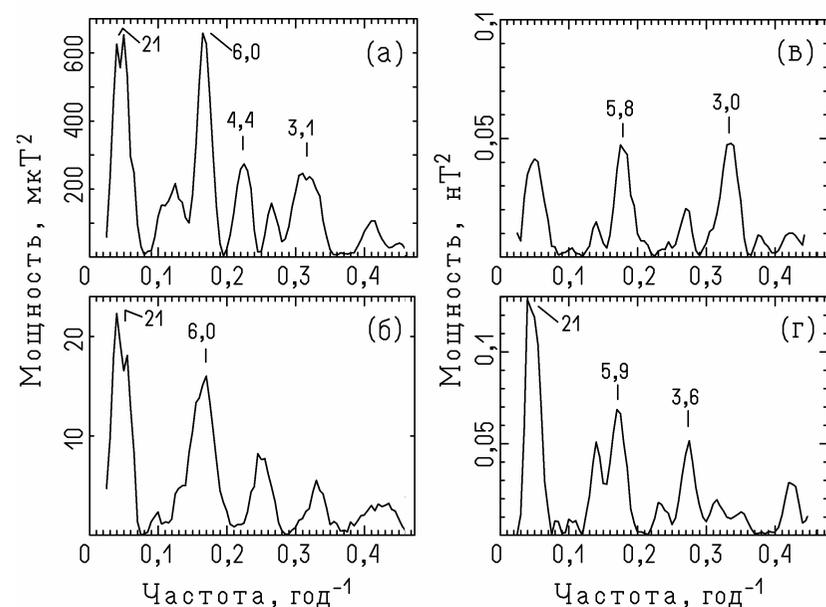


Рис.3. Спектры мощности вариаций квадрупольной гармоники фотосферного магнитного поля (а), общего магнитного поля Солнца (б), радиальной компоненты ММП (в) и азимутальной компоненты ММП (г). Для дискретных составляющих спектров, имеющих статистическую значимость выше 99%, на графиках указаны периоды колебаний в годах

эти спектры содержат лишь сравнительно слабые максимумы, как правило, статистически не достоверные. Компоненты ММП имеют в своих спектрах мощности практически те же дискретные составляющие, что и солнечное магнитное поле, но с иным соотношением между их амплитудами. При этом большее отличие от солнечного магнитного поля имеет радиальная компонента ММП, в спектре мощности которой 21-летняя составляющая имеет низкую статистическую значимость, но зато присутствует сравнительно сильная 3-хлетняя компонента, приблизительно соответствующая по частоте обертому 6-летнего колебания. Составляющая с периодом

около 3 лет присутствует в спектрах мощности солнечного магнитного поля (C_2 и ОМП), но там она сравнительно слаба.

Таким образом, колебания разных частот, присущие фотосферному магнитному полю, несколько различным образом проявляются в поведении радиальной и азимутальной компонент межпланетного поля. В простой модели ММП азимутальная компонента образуется совместно с радиальной в результате закручивания силовых линий в "спираль Паркера", и поэтому поведение компонент B_r и B_φ должно быть практически одинаковым. Однако реальная ситуация может быть несколько иной благодаря присутствию рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра и других возмущений межпланетной среды.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта №40.022.1.1105 по проекту "Пространственно-временные вариации характеристик солнечной активности".

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ерофеев Д.В., Ерофеева А.В.* Северо-южная асимметрия полярного и низкоширотного магнитного поля Солнца. // Солнечная активность и ее влияние на Землю (вып. 6), Владивосток: Дальнаука, 2002. С.68-74.
3. *Куклин Г.В., Обридко В.Н.* Динамические и структурные характеристики общего магнитного поля Солнца и межпланетного магнитного поля. // Сб. Физика солнечной активности, М.: Наука, 1989. С.146-167.
4. *Оль А.И., Шерстюков Б.Г., Трофименко Л.Т., Логинов В.Ф.* Каталог индексов солнечной и геомагнитной активности. Обнинск, 1979. 199 с.
5. *Понявин Д.И.* Квазимонопольное поведение магнитного поля Солнца, видимого как звезда. // Сб. Солнечная активность и космические лучи после смены знака магнитного поля Солнца, ГАО РАН, СПб, 2002. С.477-484.
6. *Ханейчук В.И.* Вариации общего магнитного поля Солнца: вращение и 22-летний цикл. // Изв. КрАО. 2000. Т. 96. С.176-187.
7. *Schatten K.H.* 'Source surface theory' corollary: the mean solar field – interplanetary field correlation. // Solar Phys. 1970. V. 15. P.499-503.
8. ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni

Д.В. Ерофеев

О СВЯЗИ МЕЖДУ ПЯТЕННОЙ АКТИВНОСТЬЮ В СОСЕДНИХ 11–ЛЕТНИХ ЦИКЛАХ

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование возможности предсказания характеристик будущего цикла пятенной активности по параметрам текущего цикла представляет большой интерес. Помимо прогнозирования солнечной активности в практических целях, такая возможность могла бы дать важную с теоретической точки зрения информацию о характере причинно-следственных связей между состояниями солнечного магнитного поля в разные моменты времени. Судя по результатам многочисленных теоретических и экспериментальных работ, цикл пятенной активности тесно связан с циклическими вариациями крупномасштабного магнитного поля Солнца. В работах [2,6] показано, что интенсивность крупномасштабного магнитного поля (далее КМП) в эпоху минимума активности хорошо коррелирует с высотой следующего цикла солнечных пятен. С другой стороны, высота цикла пятен не коррелирует с интенсивностью КМП в эпоху следующего минимума активности, а также и с высотой следующего цикла. Последнее обстоятельство, как считают авторы [2,6], говорит о первичной роли КМП в цикле активности и о несостоятельности модели динамо Лейтона-Шили. Последний вывод, однако, не учитывает особенности функционирования данной модели и по существу необоснован. Чтобы учесть должным образом свойства модели Лейтона-Шили, следует принять во внимание два важных обстоятельства.

Во-первых, генерация полоидального поля в модели Лейтона-Шили возможна вследствие наклона к плоскости экватора линий (осей), соединяющих магнитные полюсы биполярных активных областей (АО) [7]. Таким образом, углы наклона осей АО имеют для генерации поля не меньшее значение, чем абсолютные магнитные