

УДК 523.9-337

## ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕЛИОСФЕРНОГО ЭКВАТОРА

© 2008 г. В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Троицк, Московская область, Россия*

Поступила в редакцию 17.10.2007 г.; принята в печать 26.10.2007 г.

Показано, что центр тяжести гелиосферного экватора испытывает квазипериодические колебания. В период минимума 11-летнего цикла он несколько смещен к югу (эффект “Bashful Ballerina”). Однако в максимуме цикла это смещение меняется на обратное. Это связано с существованием солнечного квадруполья. Проведено сопоставление смещения с раствором гелиосферного токового слоя.

PACS: 96.60.Nv

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения секторной структуры на Солнце [1] привели к представлению о существовании гелиосферного токового слоя (ГТС) как поверхности, разделяющей гелиосферу на две магнитные полушария с противоположной магнитной полярностью [2]. Эту поверхность часто называют также гелиосферным экватором. Простейшей моделью в этом смысле является модель наклонного диполя [2–4], экватор которого создает синусоидальный ГТС, симметричный относительно гелиографического экватора.

Такая симметрия была получена на основе анализа преобладания той или иной полярности межпланетного магнитного поля (ММП) вблизи минимума и на фазе роста солнечного цикла активности [5]. В дальнейшем наблюдения на других фазах цикла привели к представлениям об асимметричном ГТС [6, 7]. Тем не менее результаты оставались не совсем определенными [8]. Гофрированную поверхность, образуемую ГТС, часто сравнивают с развевающейся юбкой балерины.

В 1982 г. Куклин и Обридко [9] провели анализ динамических и структурных характеристик общего магнитного поля Солнца и межпланетного магнитного поля. Для анализа были собраны все определения полярности ММП с 15 февраля 1926 г. по 2 февраля 1980 г., выполненные методом Свальгаарда–Мансурова [10–12]. Эти результаты, к сожалению, были опубликованы в малодоступных изданиях [9, 13, 14]. В частности, был обнаружен эффект, названный авторами эффектом “избыточной полярности ММП”.

Совокупность имевшихся данных о знаке ММП 730 оборотов была разбита на реализации длиной

13 оборотов каждая (351 день). Внутри каждого 27-дневного оборота подсчитывалась величина  $\Delta$ , равная разности числа дней с положительной и отрицательной полярностями. Для каждой реализации была вычислена сумма значений  $\Delta_s$ . Для интервала времени, охватываемого каталогом Кинга, эти вычисления были повторены с использованием самих величин  $B_y$ . Сравнение этих кривых показало, что они отличаются лишь несущественными деталями. Таким образом, величина  $\Delta_s$  может служить показателем эффекта избыточной полярности ММП.

Сразу же обнаружилось, что величина  $\Delta_s$  не равна нулю и что она испытывает характерное изменение с фазой цикла. Более того, за период с 1926 по 1948 гг. среднее значение  $\Delta_s$  не обращалось в нуль и оно оказалось равным 35. Поскольку данные за этот период времени малодостоверны, данное значение было вычтено из всех значений за этот период. За промежуток времени с 1948 по 1980 гг. среднее значение  $\Delta_s$  оказалось равным нулю, и необходимости в такой коррекции не было.

Оказалось, что, за исключением максимума цикла 16 (1926–1928 гг.) и ветви роста цикла 21 (1977–1979 гг.), значения  $\Delta_s$  в максимуме цикла всегда отрицательны, а в минимуме — положительны. Эта закономерность не зависит от номера цикла и не меняется при изменении знака общего магнитного поля Солнца (ОМПС). В [5, 8] была дана попытка объяснения этого эффекта с учетом квадруполья, расположенного в центре Солнца, с осью, параллельной оси вращения Солнца.

Мурсула и Хильтула [15] в своей работе проанализировали данные прямых наблюдений полярности ММП за 1965–2001 гг. и показали, что

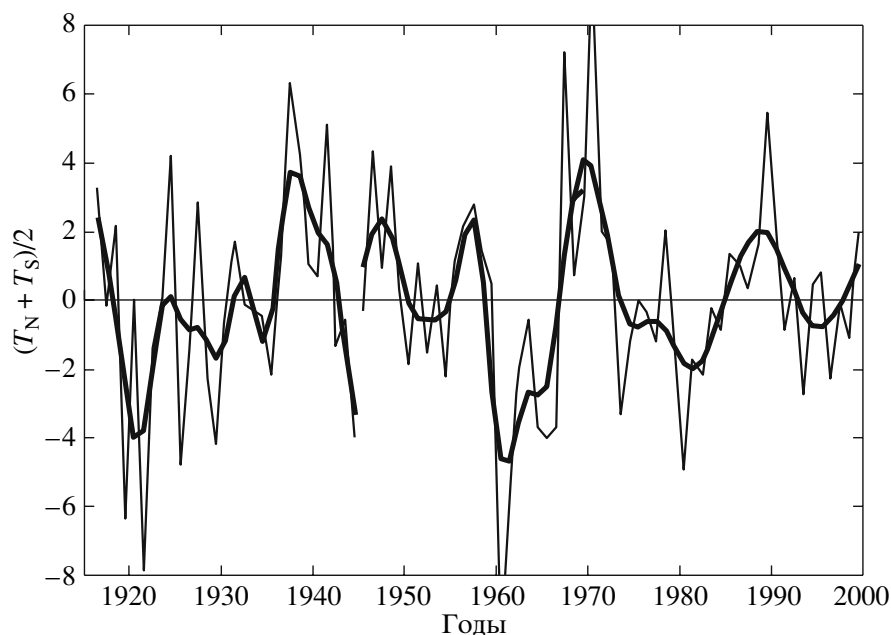


Рис. 1. Положение центра тяжести гелиосферного токового слоя. Проведены аппроксимирующие полиномы 8-ой степени.

частота полярности, соответствующей северному полушарию во время солнечных минимумов, выше, чем частота полярности, соответствующей южному полушарию Солнца. Они пришли к выводу, что ГТС смещен к югу во время солнечного минимума. Этот эффект они назвали “застенчивая балерина”, сравнивая Солнце на спаде активности с балериной, придерживающей слишком высоко взлетающую юбку (“a nickname of a “Bashful Ballerina” since the solar ballerina is pushing her excessively high flaring skirt downward whenever her activity is fading away”). Правда этот эффект проявляется при определенном сглаживании и часто наблюдаются длительные периоды, когда этот эффект отсутствует. Не совсем ясно как ведет себя центр ГТС в периоды максимумов.

Жао и др. [16] подтвердили, что этот эффект может быть связан с влиянием квадруполь и других мультиполей с положительной симметрией относительно экватора.

Таким образом, гелиосферный токовый слой с течением времени испытывает два типа изменений. В зависимости от фазы цикла основная составляющая глобального магнитного поля — глобальный диполь — наклоняется и от положения, соосного с осью вращения Солнца, переходит в положение в плоскости экватора, а далее переходит в другую полусферу [17]. Так же ведут себя и другие антисимметричные относительно экватора дипольподобные составляющие. При этом ГТС становится гофрированным, и размер этой гофрировки

или раствора  $T$  (“tilt”) исследовался неоднократно (см., например, [18]). Математически эта величина находится путем вычисления максимальной широты нейтральной линии крупномасштабного поля на поверхности источника. Затем из северной широты  $T_N$  вычитается южная (отрицательная) широта  $T_S$  и находится среднее значение. По существу так находится гелиосферный экватор. В определение раствора  $T$  входят только нечетные антисимметричные гармоники мультиполей глобального поля.

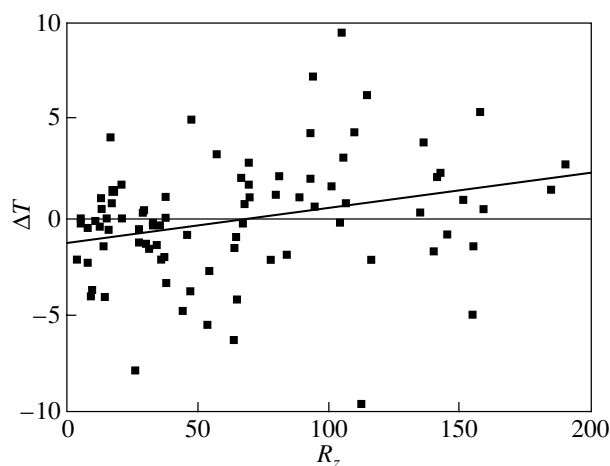
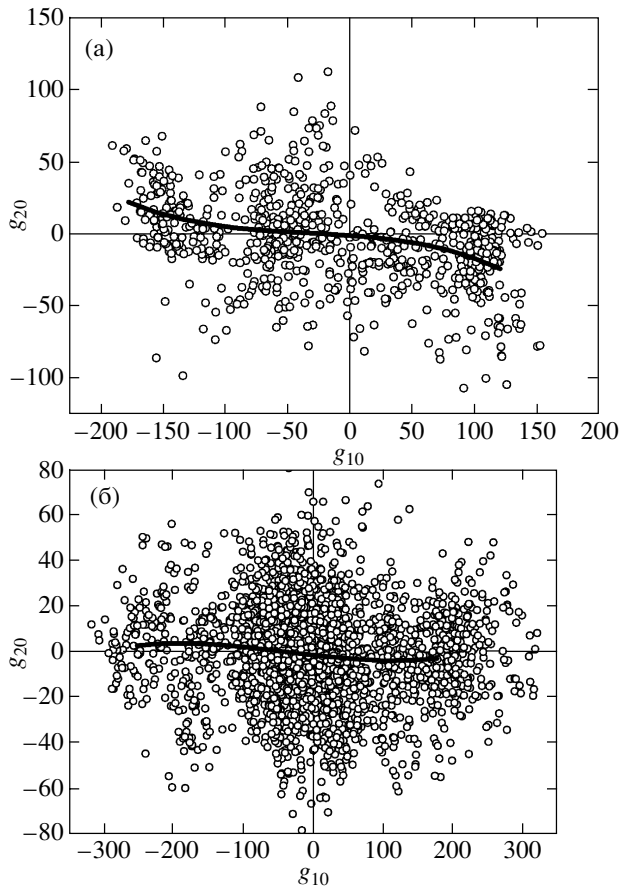
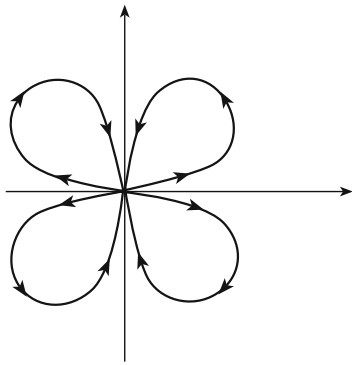


Рис. 2. Сопоставление сдвига  $\Delta T$  и относительных чисел солнечных пятен  $R_z$ . Проведена линейная аппроксимация.



**Рис. 3.** Сопоставление коэффициентов, определяющих собой квадруполь  $g_{20}$ , с коэффициентами диполя  $g_{10}$ : (а) — по данным прямых наблюдений, (б) — по восстановленным по  $N\alpha$  данным. Проведены аппроксимирующие полиномы 3-ей степени.



**Рис. 4.** Схема силовых линий квадруполь.

Четные гармоники (квадруполь и более высокие), которые не меняют знак при переходе через экватор, приводят к асимметрии ГТС. Это и озна-

чает сдвиг ГТС относительно солнечного экватора  $\Delta T$ . Математически этот сдвиг определяется как полусумма  $T_N$  и  $T_S$ . При этом сдвиг к югу, который описан в работе [15], должен давать  $T_S$  большим по модулю, чем  $T_N$ , и, следовательно,  $\Delta T < 0$ .

## 2. ВЫЧИСЛЕНИЕ СДВИГА ГТС ЗА 1915–2000 гг.

В нашем распоряжении имеются коэффициенты разложения глобального магнитного поля за период с 1915 до 2000 гг., т.е. почти за 9 циклов. Данные получены нами по наблюдениям  $N\alpha$  и описаны в работе [18]. Метод получения этих коэффициентов описан в [19].

Нами были вычислены среднегодовые значения  $T_N$  и  $T_S$  и далее  $\Delta T$ . Значения  $\Delta T$  показаны на рис. 1. Через эти точки была проведена сглаженная кривая, раздельно на интервалах 1915–1945, 1945–1970, 1970–2000 гг. Из рисунка видно, что центр тяжести гелиосферного слоя испытывает квазипериодические колебания с периодом, близким к 11-летнему. Минимумы кривой обычно оказываются в отрицательной полуплоскости, и часто они близки к минимумам солнечного цикла. Это подтверждает выводы работы Мурсулы и Хильтулы [15]. Однако в дополнение к данному факту наблюдается еще один эффект: вблизи максимумов циклов чаще встречаются положительные значения величины  $\Delta T$ , что указывает на северное направление ГТС. Иногда вблизи максимума кривая не переходит через нуль, но всегда в максимуме значение  $\Delta T$  больше, чем в минимуме.

Можно непосредственно сопоставить среднегодовые значения относительных чисел солнечных пятен  $R_z$  и сдвиг центра тяжести  $\Delta T$ . Это сопоставление показано на рис. 2. Из рисунка видно, что действительно высокие значения  $R_z$  соответствуют положительным значениям  $\Delta T$ , а малые — отрицательным. Смена знака происходит примерно при значениях  $R_z \approx 60$ –70 единиц. Именно поэтому в невысоком цикле 16 с максимумом в 1928 г., составлявшем около 70 единиц, наблюдается определенный сбой закономерности.

Природа этих эффектов связана с наличием на Солнце квадруполь, знак которого противоположен знаку основного диполя, образующего гелиосферный экватор. На рис. 3 сопоставлены два параметра разложения глобального магнитного поля. По оси абсцисс нанесены значения коэффициента  $g_{10}$ , определяющего собой величину диполя, соосного с осью вращения Солнца. По оси ординат показан коэффициент  $g_{20}$ , определяющий собой квадруполь, также соосный с осью вращения Солнца. На рис. 3а это сопоставление сделано для прямых наблюдений солнечного магнитного поля на Обсерватории Джона Вилкокса в Стенфорде,

на рис. 3б такое же сопоставление сделано по результатам восстановления магнитного поля по данным наблюдения в  $N\alpha$ . Через эти точки проведена кривая с помощью полинома 3-го порядка. Несмотря на большой разброс данных видно, что, как правило, знак  $g_{20}$  противоположен знаку  $g_{10}$ .

### 3. ПРИРОДА РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ МАКСИМУМОМ И МИНИМУМОМ ЦИКЛА

Каким же образом квадруполь, имеющий знак, противоположный диполю, приводит в минимуме к смещению ГТС к югу, а в максимуме — к северу?

На рис. 4 показана схема силовых линий этого квадруполя. Этот квадруполь будет давать вклад в ММП независимо от номера цикла и знака дипольной части ОМПС: в низких широтах северного полушария (менее  $50^\circ$ ) в виде положительной добавки и в высоких широтах в виде отрицательной добавки. В годы минимума полярная граница зоны активной области опускается до низких широт порядка  $15^\circ - 20^\circ$  и поле в северном полушарии усиливается, а в южном — ослабляется. Это приводит к смещению нейтральной линии и эффективного центра ГТС к югу. В годы максимума эта граница располагается выше критической широты, поле севернее гелиосферного экватора ослабляется, а южнее ГТС усиливается. Это приводит к смещению нейтральной линии к северу. Если цикл малой мощности, то в нем будут отсутствовать высокоширотные активные области, и граница может спуститься в низкие широты, что приведет к искажению обычной картины обсуждаемого эффекта, как и было в период с 1926 по 1936 гг.

Данный эффект можно проверить, сопоставив непосредственно положение гелиосферного экватора со сдвигом центра ГТС  $\Delta T$ . Такое сопоставление выполнено на рис. 5. Проведен полином первой степени. Несмотря на большой разброс точек, видно, что переход от отрицательного смещения (т.е. к югу) к положительному (т.е. к северу) действительно происходит тогда, когда гелиосферный экватор переходит через область смены знака квадруполя около  $50^\circ$ .

Заметим, что для того, чтобы эта картина сохранялась в течение длительного времени, необходимо, чтобы квадруполь переполосовывался одновременно с вертикальным диполем. Это означает, что вертикальный диполь и квадруполь не являются самостоятельными физическими объектами, а представляют собой первую и вторую гармоники специфического зонального распределения крупномасштабного магнитного поля.

Возвращаясь теперь к широко распространенному сравнению гелиосферного слоя с юбкой балерины, можно сказать, что балерина регулярно то

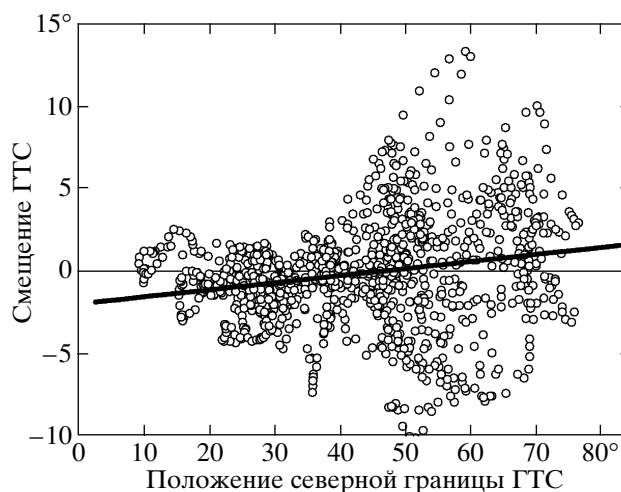


Рис. 5. Сопоставление раствора гелиосферного слоя со смещением его центра тяжести.

прижимает свою юбку, то кокетливо ее приподнимает. Можно ожидать, что в ближайшие 1–2 года значение  $\Delta T$  будет отрицательным.

Работа поддержана грантом РФФИ 05-02-16090. Авторы выражают также благодарность памяти безвременно ушедшего от нас Г.В. Куклина — некоторые из результатов настоящей работы были получены или предсказаны в работе с ним.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. M. Wilcox and N. F. Ness, *J. Geophys. Res.*, **70**, 5793 (1965).
2. M. Schulz, *Astrophys. and Space Sci.* **24**, 371 (1973).
3. A. J. Hundhausen, in: *Coronal Holes and High Speed Solar Wind Streams*, ed. J. B. Zirker (Colorado Univ. Press, Boulder, Colo., 1977), p. 298.
4. E. J. Smith, B. T. Tsurutani, and R. L. Rosenberg, *Geophys. Res.* **83**, 717 (1978).
5. R. L. Rosenberg and J. Coleman, Jr., *J. Geophys. Res.* **74**, 5611 (1969).
6. R. L. Rosenberg, *Solar Phys.* **15**, 72 (1970).
7. R. L. Rosenberg, *J. Geophys. Res.* **80**, 1339 (1975).
8. V. P. Tritakis, *J. Geophys. Res.* **89**, A8, 6588 (1984).
9. Г. В. Куклин, В. Н. Обридко, Препринт Сибирск. ин-та земн. магнетизма и распротр. радиоволн №10-82 (1982).
10. L. Svaalgaard, *Geophys. Papers. Danish Meteorol. Inst.* **R-6** (1968).
11. С. М. Мансуров, *Геоманг. и аэрон.* **7**, 768 (1969).
12. S. M. Mansurov and L. G. Mansurova, *Ann. Geophys.* **26**, 397 (1970).

13. Г. В. Куклин, В.Н. Обридко, в сб. *Физика солнечной активности* (М.: Наука, 1988), с. 146.
14. В. Н. Обридко, *Солнечные данные* **11**, 54 (1984).
15. K. Mursula and T. Hiltula, *Geophys. Res. Lett.* **30** (22), SSC 2–1–4, doi: 10.1029/2003GL018201, 21 (2003).
16. X. P. Zhao, J. T. Hoeksema, and P. H. Scherrer, *J. Geophys. Res.* **110**, A10, CiteID A10101 (2005).
17. И. М. Лившиц, В. Н. Обридко, *Астрон. журн.* **83**, 1031 (2006).
18. V. N. Obridko and B. D. Shelting, *Adv. Space Res.* (2007, в печати).
19. V. N. Obridko and B. D. Shelting, *Solar Phys.* **184**, 187 (1999).

## Temporal Variations in the Position of the Heliospheric Equator

V. N. Obridko and B. D. Shelting

It is shown that the centroid of the heliospheric equator undergoes quasi-periodic oscillations. During the minimum of the 11-year cycle, the centroid shifts southwards (the so-called bashful-ballerina effect). The direction of the shift reverses during the solar maximum. The solar quadrupole is responsible for this effect. The shift is compared with the tilt of the heliospheric current sheet.