

2. Баранов А.В., Баранова Н.Н., Лазарева Л.Ф. Анализ асимметрии профилей магнитоактивных в спектре солнечного пятна // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2008. Вып. 11. С.24-35.

3. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна. М: Мир.1967. С.384.

4. Бумба В. Результаты исследования эффекта Эвершеда в одиночных солнечных пятнах // Изв. КраАО. Москва. Изд-во АН СССР, 1959, Том XXIII, С.253-276.

5. Обриджо В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М: Наука. 1985. С. 256.

6. Cabrera Solana D., Bellot Rubio L., Del Toro Iniesta J. Temporal evolution of the Evershed flow in sunspots. 1. Observational characterization of Evershed clouds // Astron. and Astrophys. 2007. V.475, № 3. P.1067-1079

7. Cabrera Solana D., Bellot Rubio, L., Borrero J.M., Del Toro Iniesta J. Temporal evolution of the Evershed flow in sunspots. Physical properties and nature of Evershed clouds // Astron. and Astrophys. 2008. V.477, № 1. P.273-283.

8. Morinaga Shuji et. al. Center-to-limb variation of Stokes V-asymmetries in solar pores observed with the Hinode spectro-polarimeter // Publ. Astron. Soc. Jap. 2007. v.59. P.613-617

9. Otsuji Kenichi et. al. Small-scale magnetic-flux emergence observed with Hinode Solar Optical Telescope // Publ. Astron. Soc. Jap. 2007. V.59. P.649-654

10. Rieethmuller T. L., Solanki S. K., Lagg A..Stratification of sunspot umbral dots from inversion of Stokes profiles recorded by Hinode // Astrophys. J. 2008. V.678. № 2. Part 2. P.157-160.

11. Sainz Dalda A., Bellot Rubio L., Detection seaserpent field lines in sunspot penumbrae// Astron. and Astrophys. 2008. V.481, № 1. P. L.21-L24

12. Sobotka M., Roudier T. Properties of sunspot moats derive from horizontal motions // Astron. and Astrophys. 2007. V.472, № 1. P.277-282.

13. Zang J., Solanki S. K., Woch J. Discovery of inward moving magnetic enhancements in sunspot penumbrae // Astron. and Astrophys. 2007. V.475, № 2. P.695-700.

## ФЛУКТУАЦИИ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА МЕЖ-ПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СВЯЗАННЫЕ С АЛЬВЕНОВСКИМИ ВОЛНАМИ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ

Хорошо известно, что межпланетное магнитное поле (ММП) подвержено флуктуациям, амплитуда которых сравнима с его регулярной составляющей [5,6,8]. Эти флуктуации содержат поперечную (по отношению к невозмущенному магнитному полю) компоненту, вызывающую значительные вариации направления ММП. Статистика угловых распределений ММП исследовалась в ряде работ, хотя полученные результаты не всегда согласуются. Так, в [2] не было найдено связи между колебаниями направления ММП, происходящими в разных плоскостях, а также существенных вариаций углового распределения магнитного поля с фазой солнечного цикла. Однако в статье [7] показано, что вблизи минимумов солнечной активности имеет место корреляция между флуктуациями ММП, происходящими в азимутальной и меридиональной плоскостях гелиосферы. При этом знак корреляции оказался зависящим от направления радиальной компоненты ММП и ориентации дипольного магнитного поля Солнца. Обнаруженные в [7] факты свидетельствуют о том, что изучение угловых распределений ММП далеко не закончено и обещает дать новые интересные результаты относительно физических процессов в гелиосфере, а также их связи с процессами на Солнце.

В настоящей работе использованы измерения вектора ММП на околоземных орбитах в 1965–2008 гг., собранные в хорошо известной базе данных OMNI-2 [9]. Среднечасовые значения компонент вектора магнитного поля  $\mathbf{V}$  даны в системе отсчета RTN (орт  $\mathbf{R}$  направлен радиально от Солнца,  $\mathbf{T}=[\mathbf{W},\mathbf{R}]$ ,  $\mathbf{N}=[\mathbf{R},\mathbf{T}]$ , где  $\mathbf{W}$  – единичный вектор, параллельный солнечной оси вращения). При усреднении данных за год можно считать, что плоскость RT совпадает с плоскостью гелиоэкватора. Направление ММП принято описывать

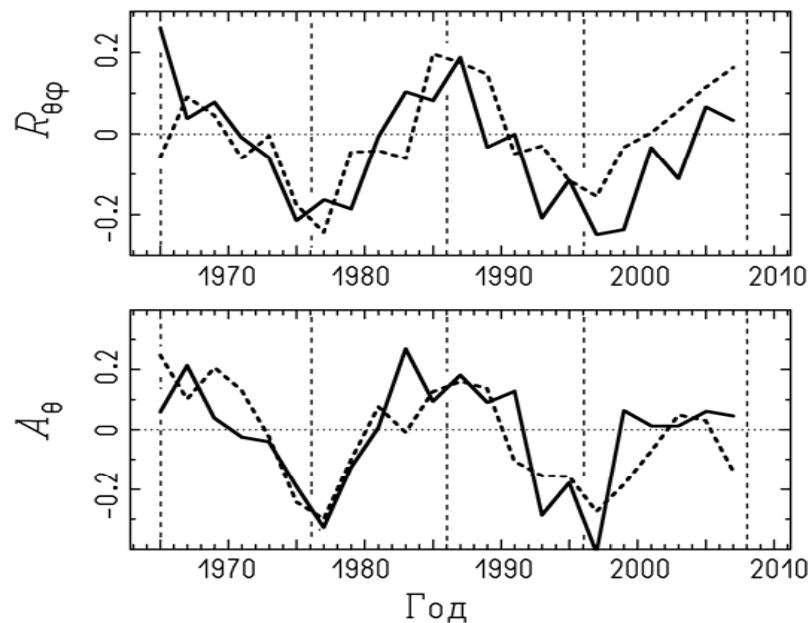


Рис.1. Коэффициент корреляции между вариациями меридионального и азимутального углов ММП (верхний график) и индекс асимметрии распределения меридиональных углов ММП (нижний график). Сплошная и штриховая линии соответствуют положительному и отрицательному секторам ММП, вертикальными пунктирными линиями обозначены минимумы солнечной активности

двумя углами, азимутальным  $\varphi$  (отсчитывается в плоскости RT от положительного направления оси R) и меридиональным  $\theta$  (отсчитывается на север от плоскости RT). Массив данных был разделен на две выборки, соответствующие направлениям магнитного поля преимущественно от Солнца (положительный сектор ММП) и к Солнцу (отрицательный сектор ММП). Измерение, сделанное в момент  $t$ , считалось принадлежащим положительному или отрицательному сектору, если в течение интервала  $t \pm 2$  сут выполнялось условие соответственно  $\langle B_R \rangle > 0$  или  $\langle B_R \rangle < 0$ , где  $\langle B_R \rangle$  – сглаженные за 24 ч значения радиальной компоненты ММП. Таким образом, кратковре-

менные изменения направления  $B_R$  внутри секторов не исключались, в то же время окрестности секторных границ были исключены.

Связь между вариациями меридионального и азимутального углов ММП обнаруживается по линейной корреляции между ними. Временная зависимость коэффициента корреляции  $R_{\theta\varphi}$ , полученная по 2-хлетним выборкам, приведена на рис.1. Можно видеть хорошо выраженное колебание  $R_{\theta\varphi}$ , происходящее с периодом 22-летнего магнитного (хэйловского) цикла Солнца, причем экстремумы имеют место вблизи эпох минимумов активности. Корреляцию нельзя назвать высокой ( $|R_{\theta\varphi}| \approx 0,2$ ), однако она является вполне достоверной ввиду большого числа независимых отсчетов в каждой выборке ( $10^3$  и более). Знак корреляции для флуктуаций углов одинаков в обоих секторах ММП (заметим, что при этом знак корреляции для компонент вектора ММП  $B_R$  и  $B_N$  в разных секторах будет разным, как и найдено в [7]).

Отметим также следующий интересный факт. Хотя средние за интервал порядка года значения меридионального угла малы и не обнаруживают явной связи с солнечным циклом, распределение углов  $\theta$  не симметрично относительно гелиоэкватора. Это хорошо видно по поведению индекса асимметрии распределения

$$A_{\theta} = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}},$$

где  $\mu_n$  – центральные моменты распределения порядка  $n$ . Как можно видеть на рис.1, асимметрия изменяется с периодом хэйловского цикла, также как и коэффициент корреляции углов  $R_{\theta\varphi}$ . В качестве примера на рис.2,а показано угловое распределение ММП для минимума активности 1996 г., которое демонстрирует вполне заметную корреляцию углов и асимметрию вариаций относительно экватора ( $R_{\theta\varphi} = -0,17$ ,  $A_{\theta} = -0,50$ ).

Зависимость между вариациями углов  $\theta$  и  $\varphi$  означает, что поперечные флуктуации ММП некоторым образом поляризованы, причем направление поляризации изменяется в ходе магнитного цикла Солнца. При этом асимметрия распределения углов  $\theta$  указывает на то, что поляризация не является строго линейной. Вероятной физической причиной этого является распространение волн Альвена, ко-

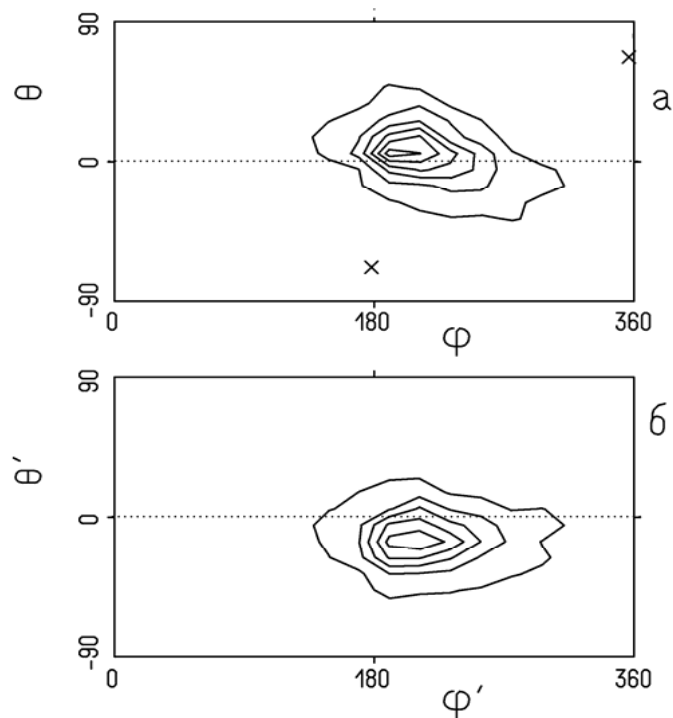


Рис.2. (а) – угловое распределение ММП в минимуме 22 цикла (1996 г.), для отрицательного сектора; (б) – то же в системе координат с полярной осью  $\mathbf{Z}$  (см. текст). Прямое и обратное направления  $\mathbf{Z}$  показаны на рис.1,а крестиками

торые дают существенный вклад в флуктуации ММП с периодами короче суток [4,5,6,8]. Как хорошо известно, направление колебаний магнитного поля в альвеновской волне малой амплитуды определяется взаимной ориентацией векторов невозмущенного поля  $\mathbf{V}_0$  и фазовой скорости волны  $\mathbf{V}$ : возмущение ориентировано в направлении, ортогональном к обоим векторам  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{V}_0$ , и если последние не параллельны, то колебания будут линейно поляризованными. Значит, при известном  $\mathbf{V}_0$  по поляризации волны можно найти и направление ее распространения. Однако альвеновские волны в межпланетном пространстве не являются слабыми, и для них линейная поляризация,

вообще говоря, не имеет места. Теория волн Альвена большой амплитуды (в приближении «простых волн») дана в [1]. Поскольку такие волны несжимаемы, при их прохождении модуль магнитного поля не изменяется,  $|\mathbf{V}| = \text{const}$  (здесь  $\mathbf{V}$  – полное магнитное поле, включающее невозмущенную составляющую и возмущение, которые в нелинейном случае динамически не разделяются). Кроме того, отсутствуют колебания магнитного поля в направлении распространения волны  $\mathbf{Z}$ ,  $B_Z = \text{const}$ . Из этих двух условий следует, что вектор  $\mathbf{V}$  в процессе колебаний должен оставаться лежащим на поверхности конуса с осью  $\mathbf{Z}$  (а не на плоскости, как следует из линейной теории для волн малой амплитуды). Угол между осью и образующей конуса (угол раствора)  $\alpha$ , очевидно, равен углу между  $\mathbf{Z}$  и направлением невозмущенного поля, которое в случае ММП совпадает с направлением паркеровской спирали. Вырождение конуса в плоскость ( $\alpha = 90^\circ$ ) возможно как частный случай, если волна распространяется ортогонально невозмущенному полю.

Таким образом, свойства угловых распределений ММП указывают на то, что существует некоторое преимущественное направление распространения нелинейных волн Альвена, разное в секторах ММП разного знака, причем это направление в общем не совпадает с направлением среднего магнитного поля и медленно изменяется в ходе солнечного цикла. Исходя из этого, можно найти параметры поляризации и направление распространения низкочастотных волн Альвена в межпланетном пространстве, по крайней мере для периодов низкой солнечной активности. Формально задача состоит в нахождении направления оси  $\mathbf{Z}$  и угла раствора  $\alpha$  конуса, наилучшим образом соответствующих наблюдаемым распределениям угловых флуктуаций ММП. На практике «наилучшее соответствие» определялось исходя из следующих соображений. Если повернуть полярную ось системы координат так, чтобы она совпала с направлением  $\mathbf{Z}$ , то среднее значение меридионального угла ММП  $\theta'$  в новой системе будет характеризовать положение образующей конуса, вблизи которого происходит движение вектора магнитного поля, а среднеквадратичное отклонение (СКО) угла  $\theta'$  будет характеризовать случайные отклонения  $\mathbf{V}$  от образующей конуса. Поскольку вектор  $\mathbf{Z}$

заранее неизвестен, следует найти такое его направление, которое для данной выборки обеспечивает минимум СКО угла  $\theta'$ . Этот метод, однако, является корректным только если угол  $\alpha$  значительно больше СКО меридионального угла  $\theta'$ , что в случае ММП ограничивает применимость его условием  $\alpha > 30\text{--}40^\circ$ . Поскольку описанным способом вектор  $\mathbf{Z}$  может быть найден с точностью до отражения, примем что его азимутальный угол лежит в интервале от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ . Такой выбор сделан на основе хорошо известного факта, что межпланетные волны Альвена распространяются преимущественно от Солнца (об этом свидетельствует знак корреляции между флуктуациями магнитного поля и скорости плазмы).

Для расчетов взяты ряды данных длиной в 1 год, причем, как и раньше, секторы ММП разного знака представлены отдельными выборками. На рис.2,б в качестве примера показан результат преобразования углового распределения ММП в новую систему координат, у которой полярная ось совпадает с найденным направлением  $\mathbf{Z}$ . Можно видеть, что связь между углами, вполне заметная в исходной системе координат (рис.2,а), после преобразования исчезает, а само распределение заметно сдвинуто относительно  $\theta' = 0$ , что соответствует довольно большому, но меньшему  $90^\circ$  углу раствора конуса (оценка для этого случая дает  $\alpha = 78^\circ$ ). Этот пример является характерным для выборок данных, полученных вблизи минимумов солнечной активности; для этих периодов времени расчет, как правило, дает углы раствора конуса  $\alpha \approx 50\text{--}80^\circ$ . Вблизи максимумов активности получаются значительно меньшие углы  $\alpha \sim 30\text{--}40^\circ$ , для которых применяемый метод расчета уже не является вполне корректным. Можно лишь сделать качественный вывод, что при высокой солнечной активности направление распространения альвеновских волн, вероятно, составляет сравнительно небольшой угол с направлением среднего магнитного поля.

Рассмотрим, как ориентирован вектор  $\mathbf{Z}$  по отношению к Солнцу и направлению регулярного ММП. Для этой цели взяты выборки данных длиной в 1 год, в сумме охватывающие периоды по 5 лет вблизи минимумов солнечной активности. Из полученного набора данных затем были исключены несколько выборок, у которых корреляция углов имеет низкую статистическую значимость,  $|R_{\theta\phi}| <$

0,1, и/или глубина минимума СКО оказалась малой (менее 10%), а результаты, следовательно, ненадежными. В итоге осталось 26 надежных определений направления вектора  $\mathbf{Z}$ , заданных углами  $\phi$ ,  $\theta$  в исходной системе координат RTN. Напомним что линия  $\theta = 0$  соответствует плоскости гелиоэкватора, а линия  $\phi = 0$  – меридиональной плоскости гелиосферы, проходящей через точку наблюдения; направление спирали Паркера (т.е. невозмущенного магнитного поля) в среднем соответствует  $\phi = +41^\circ$ ,  $\theta = 0$ , с незначительными (в несколько градусов) изменениями от года к году. Направления вектора  $\mathbf{Z}$  показаны на рис.3, отдельно для периодов вблизи минимумов нечетных и четных циклов солнечной активности (минимумы нечетных циклов имели место в 1965, 1986, 2008 г., а четных – в 1976 и 1996 г.).

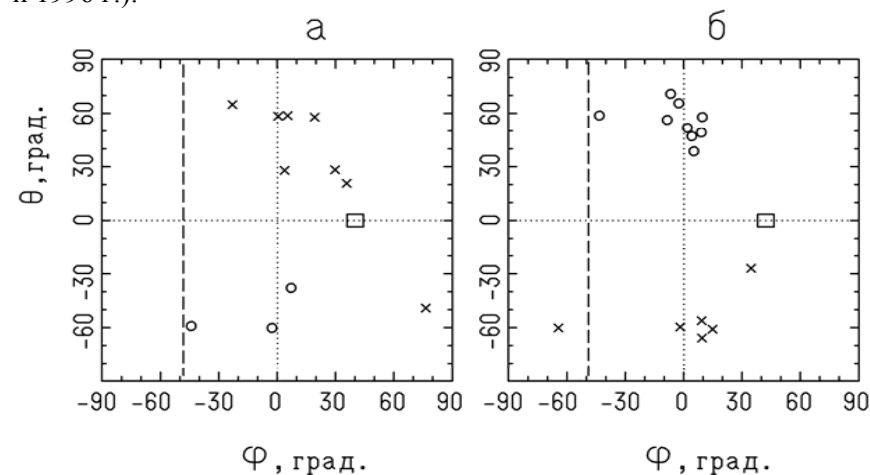


Рис.3. Направления распространения низкочастотных волн Альвена, для периодов времени вблизи минимумов нечетных (а) и четных (б) циклов солнечной активности. Результаты для положительного и отрицательного секторов ММП показаны соответственно крестиками и кружками, область вариаций направления невозмущенного ММП обозначена прямоугольником.

На рис.3 можно видеть, что ось  $\mathbf{Z}$  в периоды низкой солнечной активности, как правило, ориентирована со значительным ( $>30^\circ$ ) наклоном к плоскости гелиоэкватора, причем наклон в положительном и отрицательном секторах ММП противоположен по знаку.

Кроме того, он изменяется с периодом хэйловского цикла: так, в положительном секторе ММП он положителен в минимумах нечетных, и отрицателен в минимумах четных циклов активности, в отрицательном секторе – наоборот (исключение составляет одна выборка, соответствующая 2006 г.). В то же время направления оси  $\mathbf{Z}$  заметно концентрируются вблизи меридиональной плоскости,  $\varphi = 0$ . Это соответствует тому факту, что угол раствора конуса  $\alpha$ , как правило, существенно меньше  $90^\circ$ . Если бы изменения направления ММП происходили не вблизи конической поверхности, а в плоскости, наклоненной к гелиоэкватору, то направления оси  $\mathbf{Z}$  составляли бы угол  $90^\circ$  с направлением невозмущенного магнитного поля. Следовательно, они концентрировались бы вблизи плоскости  $\varphi = -49^\circ$ , которая показана вертикальной штриховой линией на рис.3. На самом деле, только в 4 случаях из 26 ось  $\mathbf{Z}$  лежит сравнительно недалеко от указанной плоскости, при этом оценка угла раствора конуса дает значения  $>80^\circ$ . Учитывая, что вероятные ошибки определения углов составляют несколько градусов, можно заключить, что в этих случаях конус практически вырождается в плоскость. В большинстве же случаев оценка угла  $\alpha$  дает существенно меньшие значения ( $50-80^\circ$ ). Заметим также, что при перемещении вектора магнитного поля по образующей конуса и значительном наклоне оси конуса к гелиоэкватору колебания ММП должны быть асимметричными относительно  $\theta = 0$ . Этим, очевидно, и объясняется циклическое изменение асимметрии распределения меридиональных углов ММП, которое можно видеть на рис.1.

Как отмечено выше, в периоды низкой солнечной активности вектор  $\mathbf{Z}$  имеет значительную меридиональную компоненту, причем направленную от гелиографического экватора в сторону одного из полюсов. Важное значение имеет также ориентация  $\mathbf{Z}$  по отношению к магнитному экватору гелиосферы, который физически представлен гелиосферным токовым слоем (ГТС). Как хорошо известно, ГТС имеет наклон к плоскости гелиоэкватора и вращается вместе с Солнцем, в результате этого Земля поочередно попадает в северное и южное магнитные полушария гелиосферы, что и проявляется как чередование секторов ММП разного знака. В минимумах нечетных циклов магнитное поле положительно на южном полюсе Солнца, и,

следовательно, в периоды, когда Земля попадает в положительный сектор ММП, она находится в южном магнитном полушарии гелиосферы. Соответственно, гелиосферный токовый слой в это время расположен севернее точки наблюдения. При этом, как видно на рис.3,а, вектор  $\mathbf{Z}$  имеет компоненту, направленную на север, т.е. к ГТС. Аналогично, нахождение Земли в отрицательном секторе ММП означает, что ГТС расположен южнее точки наблюдения, и поскольку вектор  $\mathbf{Z}$  в это время имеет компоненту с южным направлением (рис.3,а), то он также направлен в сторону токового слоя. В минимумах четных циклов полярность солнечного магнитного поля противоположна той, которая имеет место в минимумах нечетных циклов, при этом и направление меридиональной компоненты вектора  $\mathbf{Z}$  в обоих секторах ММП также изменяется на противоположное (рис.3,б). Следовательно, в периоды низкой солнечной активности вектор  $\mathbf{Z}$  всегда направлен от точки наблюдения в сторону ГТС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ахизер А.И. и др. Электродинамика плазмы. М. Наука. 719 с. 1974.
2. Веселовский И.С., Тарсина М.В. Угловое распределение вектора межпланетного магнитного поля. // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41. С. 471-476.
3. Ерофеев Д.В. 22-летняя и 11-летняя вариации анизотропии колебаний ММП // Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений (Тр. XI Пулковской междунар. конф. по физике Солнца), СПб, ГАО РАН, 2007. С. 165–168.
4. Balcher J.W., Davis L. Large amplitude Alfvén waves in the interplanetary medium // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 3534–3563.
5. Bruno R., Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // Living Reviews in Solar Physics (<http://solarphysics.livingreviews.org/articles/lrsp-2005-4>). 2005.
6. Goldstein M.L., Roberts D.A., Matthaeus W.H. Magnetohydrodynamic turbulence in the solar wind // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1995. V. 33. P. 283-325.
7. Lyatsky W., Tan A., Lyatskaya S. Effect of Sun's magnetic field polarity on interplanetary magnetic field Bz // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. No 24. p. 2258.
8. Tu C.-Y., Marsch E. MHD structures, waves, and turbulence in solar wind: observations and theories. // Space Sci. Rev. 1995. V. 73. P. 1-210.
9. [ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft\\_data/omni/](ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/)