

Д.В. Ерофеев

ГЕЛИОШИРОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ АНИЗОТРОПИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель настоящей работы – продолжение исследований анизотропии низкочастотных флуктуаций межпланетного магнитного поля (ММП). В работах [1,2] для этого использовались данные измерений, полученных космическими аппаратами (КА) на околоземных орбитах, при этом были обнаружены интересные особенности в поведении ориентации анизотропии в связи с магнитным циклом Солнца. Измерения на околоземных орбитах охватывают большой интервал времени (4 цикла солнечной активности), однако ограничены узкой областью гелиографических широт $\pm 7,25^\circ$. Для исследования гелиоширотной зависимости анизотропии флуктуаций на разных фазах солнечного цикла в настоящей работе проанализированы данные КА *Ulysses*.

ДАННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

КА *Ulysses*, разработанный совместно агентствами ESA и NASA, запущен в 1990 г. и выведен на гелиоцентрическую орбиту с наклоном около 80° к плоскости солнечного экватора [6]. Установленные на аппарате приборы производят непрерывные измерения ряда параметров плазмы солнечного ветра, в частности вектора межпланетного магнитного поля \mathbf{V} . Орбита КА имеет большой эксцентриситет, поэтому при движении вблизи перигелия, один раз в 6 лет, аппарат быстро (за 10,5 мес.) перемещается из южной полярной зоны гелиосферы в северную, при этом его гелиоцентрическое расстояние изменяется в пределах 1,3–2,4 а.е. Перемещение по широте в обратном направлении (с севера на юг) происходит значительно дольше и на больших гелиоцентрических расстояниях, до 5,4 а.е. Для исследования трехмерной структуры гелиосферы лучше всего

подходят данные, полученные в ходе быстрых перемещений КА *Ulysses* вблизи перигелия («широтных сканов»), поскольку за время одного скана крупномасштабная структура гелиосферы, по-видимому, не успевает существенно измениться. В настоящее время имеются три таких широтных скана: сентябрь 1994 г. – июль 1995 г., около минимума солнечной активности; ноябрь 2000 г. – октябрь 2001 г., вблизи максимума активности, в период смены знака полярного магнитного поля Солнца; февраль 2007 г. – январь 2008 г., снова около минимума активности.

В настоящей работе анализируются среднечасовые значения вектора ММП \mathbf{V} , полученные по данным магнитометра *Ulysses* в ходе трех упоминавшихся выше быстрых широтных сканов. Кроме того, для сравнения использованы среднечасовые значения \mathbf{V} по измерениям на околоземных орбитах, взятые из хорошо известной базы данных OMNI-2 [7]. Все исходные данные представлены в прямоугольной системе координат RTN. В этой системе начало отсчета совпадает с точкой измерения, 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.

Интересующая нас физическая характеристика – анизотропия низкочастотных флуктуаций ММП. Особый интерес представляет анизотропия флуктуаций, поперечных по отношению к направлению среднего магнитного поля \mathbf{V}_0 , потому что такие флуктуации в значительной степени связаны с несжимаемыми (альвеновскими) возмущениями плазмы. Анизотропию поперечных флуктуаций ММП будем называть поляризацией, так как она, по-видимому, физически обусловлена поляризацией межпланетных альвеновских волн [1,2]. Фактически мы рассматриваем флуктуации ММП часового диапазона периодов, при этом среднее магнитное поле \mathbf{V}_0 представлено сглаженными за сутки значениями вектора ММП. Обоснование и подробное изложение методики исследования даны в [2], здесь приведем ее краткое описание.

Флуктуации магнитного поля $\delta\mathbf{V}(t)$ выделялись из исходного временного ряда $\mathbf{V}(t)$ с помощью нерекурсивного цифрового фильтра, пропускающего колебания с периодами 2–5 ч. Затем

данные разделялись на две выборки, соответствующие положительному и отрицательному секторам ММП (принадлежность к секторам определялась по знаку радиальной компоненты \mathbf{V}_0). После этого определялись компоненты флуктуаций δB_i в прямоугольной системе координат XYZ, такой, что ось Z совпадала с направлением $\pm\mathbf{V}_0(t)$ (знак «-» для отрицательного сектора ММП), а ось X лежала в плоскости, содержащей вектор \mathbf{V}_0 и ось N исходной системы координат RTN. Таким образом, компоненты δB_X и δB_Y соответствуют поперечной составляющей флуктуаций, а δB_Z – продольной. Для каждой из полученных выборок считалась двумерная ковариационная матрица $\langle \delta B_i(t) \cdot \delta B_j(t) \rangle$, $i, j = X, Y$, собственные числа λ_i ($\lambda_1 \geq \lambda_2$) и собственные векторы \mathbf{v}_i которой позволяют определить два параметра поляризации поперечных флуктуаций ММП. Этими параметрами являются степень поляризации

$$S = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

и ее ориентация, которая определяется направлением собственного вектора \mathbf{v}_1 и описывается позиционным углом P . Угол P отсчитывался от северного конца оси X, в интервале от -90° до 90° . Продольная анизотропия флуктуаций, т.е. их анизотропия относительно направления среднего магнитного поля, описывалась параметром

$$A = \frac{D_\perp}{2D_\parallel},$$

где D_\parallel и D_\perp – дисперсии параллельной и ортогональной по отношению к \mathbf{V}_0 составляющих флуктуаций. Заметим, что для изотропных флуктуаций $S=0$, $A=1$. При расчетах параметров поляризации использовались различные интервалы усреднения по времени, о чем будет сказано ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 представлены параметры анизотропии флуктуаций ММП часового диапазона, рассчитанные по измерениям на околоземных орбитах. Расчеты сделаны с усреднением по времени в 1 год,

что обеспечивает хорошую статистическую обеспеченность отдельных оценок параметров (как правило, несколько тысяч независимых значений вектора ММП). Графики рис.1 демонстрируют интересную особенность поляризации поперечных флуктуаций ММП, описанную ранее [2]: позиционный угол P изменяется в ходе 22-хлетнего магнитного цикла Солнца, причем изменения его в положительном и отрицательном секторах ММП происходят противофазно. Экстремумы 22-летней вариации P приходятся на периоды около минимумов солнечной активности, и на этой же фазе цикла, как правило, имеет место наиболее высокая степень поляризации, $S = 0,3-0,4$.

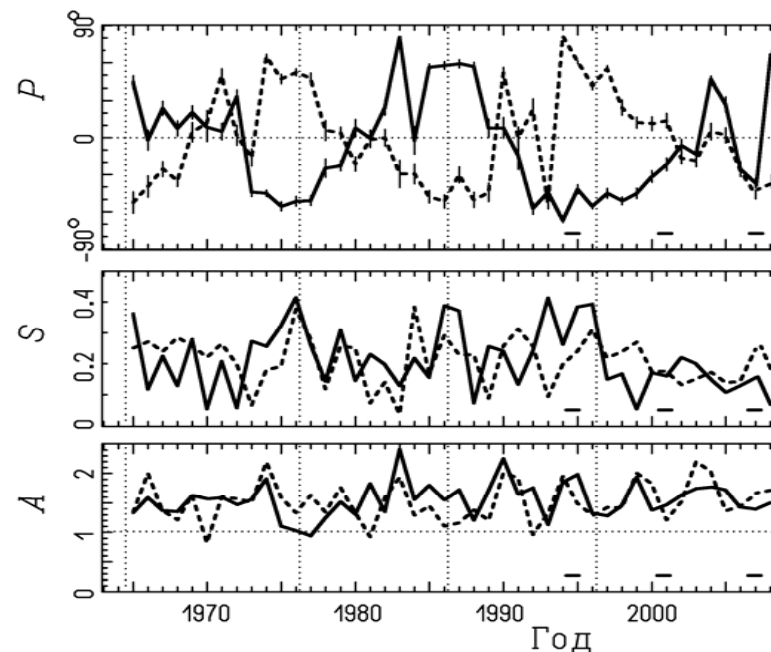


Рис.1. Параметры анизотропии флуктуаций ММП часового диапазона, по данным измерений на околоземных орбитах (P и S – позиционный угол и степень поляризации поперечной компоненты, A – отношение мощностей поперечной и продольной компонент флуктуаций). Сплошная и штриховая линии соответствуют отрицательному и положительному секторам ММП, вертикальными пунктирными линиями обозначены эпохи минимумов солнечной активности

Последний минимум активности 2007–08 гг. отличается некоторой аномальностью в поведении поперечных флуктуаций ММП – сравнительно низкой степенью их поляризации S , особенно в отрицательном секторе ММП, где, кроме того, и ориентация поляризации неустойчива (угол P быстро изменяется в больших пределах). Продольная анизотропия флуктуаций существенно варьируется, но величина ее почти все время превышает 1 (то есть, поперечные флуктуации преобладают над продольными). Вариации A не показывают явной связи с солнечным циклом; однако в минимумах активности этот параметр, как правило, имеет сравнительно небольшие значения.

Рассмотрим теперь, как изменяется анизотропия флуктуаций ММП с гелиоширотой по данным КА *Ulysses*, полученным в ходе трех его быстрых широтных сканов (временные рамки сканов показаны горизонтальными отрезками на рис. 1). Следует отметить, что статистическая надежность определения интересующих нас параметров по данным *Ulysses* получается несколько ниже, чем по данным OMNI-2. Это связано с тем, что время одного широтного скана КА *Ulysses* – менее года, а чтобы получить приемлемое разрешение по широте, интервалы усреднения по времени должны быть взяты еще более короткими. Поэтому расчеты были проделаны двумя способами: в первом случае брались большие интервалы временного усреднения, чтобы получить наибольшую статистическую обеспеченность результатов, соответственно разрешение по широте было низким ($\approx 30^\circ$); во втором случае предпочтение отдавалось разрешению по гелиошироте. В целом описанные ниже выводы подтверждаются обоими способами, для иллюстрации же будут показаны результаты, полученные с лучшим разрешением по широте ($\approx 15^\circ$).

На рис.2 показаны параметры анизотропии флуктуаций ММП в зависимости от гелиошироты, для периодов времени около минимумов солнечного цикла. В эти периоды ММП в высокоширотных областях гелиосферы было практически униполярным, а секторная структура наблюдалась только на низких широтах. Это видно по поведению показанного на рис.2 параметра q , который представляет собой долю времени, в течение которого регистрировалось магнитное поле данной полярности ($q = 1$ соответствует уни-

полярному полю). Сравнение данных рис.2 и рис.1 показывает, что в приэкваториальной зоне, как и следовало ожидать, параметры поляризации поперечных флуктуаций ММП по данным *Ulysses* и по данным OMNI-2 в целом согласуются. Это касается как значительной степени поляризации S , так и ее ориентации, которая различна в секторах ММП разного знака. Правда, позиционные углы P вблизи экватора по данным *Ulysses* получились несколько меньшими по абсолютной величине ($30\text{--}40^\circ$ против $40\text{--}60^\circ$ по данным OMNI-2), что может быть связано с различием в гелиоцентрическом расстоянии. Графики рис.2 показывают, что ориентация анизотропии в каждом из секторов ММП примерно постоянна на широтах до $20\text{--}30^\circ$.

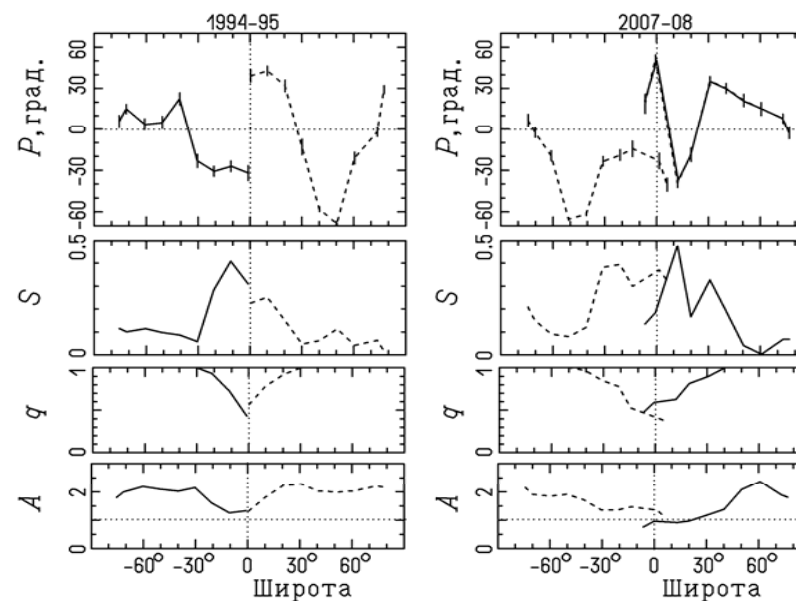


Рис.2. Параметры анизотропии флуктуаций ММП часового диапазона в зависимости от гелиографической широты. Слева и справа приведены результаты для двух быстрых широтных сканов КА *Ulysses*, пришедшихся на периоды около минимумов солнечной активности (1994–95 гг. и 2007–08 гг.). Сплошная и штриховая линии соответствуют отрицательному и положительному секторам ММП

Исключение составляет отрицательный сектор ММП в период 2007–2008 г., когда имело место изменение обоих параметров поляризации в низкоширотной зоне. Последнее согласуется с упоминавшимся выше нестабильным поведением поляризации в этот период по данным OMNI-2.

Новая информация, которая следует из данных рис.2, – это то, что поведение поляризации поперечных флуктуаций магнитного поля, характерное для приэкваториальной области гелиосферы, имеет место только в пределах зоны с секторной структурой ММП. В 1994–1995 г.г. эта зона занимала область широт примерно $\pm 30^\circ$, и только в ней имела место значительная поляризация, $S \geq 0,2$; в 2007 г. секторная структура ММП наблюдалась в несколько более широкой зоне, до $\pm 40^\circ$, и область высоких значений S тоже была более широкой. За пределами зоны с секторной структурой, т.е. вдали от гелиосферного токового слоя, степень поляризации поперечных флуктуаций ММП мала, в среднем около 0,1. При реально имеющейся статистической обеспеченности расчетов такие значения S лежат на границе достоверности, поэтому можно заключить, что в периоды низкой солнечной активности на средних и высоких гелиоширотах поляризация поперечных флуктуаций ММП мала или отсутствует. В то же время продольная анизотропия флуктуаций ММП (параметр A) изменяется с гелиоширотой обратным образом, имея наименьшие значения в приэкваториальной зоне, и значительно большие – на высоких широтах. Таким образом, в зоне с секторной структурой ММП анизотропия флуктуаций в значительной степени обусловлена степенью поляризации их поперечной компоненты, при сравнительно слабом различии мощностей продольной и поперечной компонент; в средне- и высокоширотных зонах, занятых униполярным магнитным полем, анизотропия определяется главным образом преобладанием мощности поперечной компоненты флуктуаций над продольной.

На рис.3 представлены результаты, полученные по данным КА *Ulysses* для широтного скана 2000–2001 г.г., который пришелся на период высокой солнечной активности и смены знака полярного магнитного поля Солнца. В рассматриваемый период северная приполярная зона гелиосферы на широтах выше 70° уже была занята

униполярным магнитным полем отрицательной полярности, в южной же полярной зоне секторная структура отчетливо наблюдалась вплоть до самых высоких исследованных широт $\approx 80^\circ$, хотя положительная полярность здесь заметно преобладала (это видно по поведению параметра q). Данные рис.3 позволяют сделать следующие

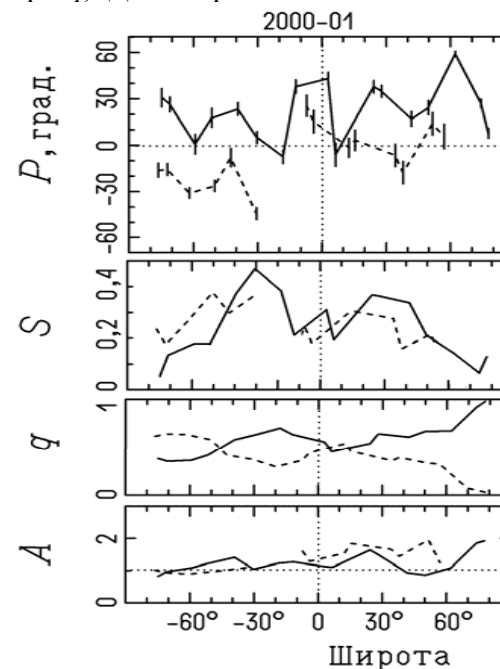


Рис.3. То же что на рис.2, но для периода смены знака полярного магнитного поля Солнца (широтный скан 2000–2001 г.).

выводы. На фазе максимума солнечного цикла степень поляризации поперечных флуктуаций ММП в приполярных зонах гелиосферы (на широтах выше $50\text{--}60^\circ$) была низкой, также как и на фазе минимума солнечной активности. При этом в южной приполярной зоне, где наблюдалась секторная структура, параметр продольной анизотропии A практически не отличался от 1, т.е. в этой зоне анизотропия флуктуаций вообще была весьма слабой. Высокая степень поляри-

зации поперечных флуктуаций имела место на низких и средних широтах, причем наибольшие значения S наблюдались не у экватора, а на широтах 20–40° в обеих полушариях гелиосферы. Судя по поведению S и позиционного угла P , в каждом секторе ММП имелось две или больше широтных зон, различающихся ориентацией поляризации флуктуаций; при этом наблюдалось систематическое различие $\approx 40^\circ$ между позиционными углами поляризации в секторах ММП разного знака, что напоминает ситуацию в периоды низкой активности. К сожалению, в настоящее время имеется только один быстрый широтный скан КА *Ulysses*, охватывающий фазу максимума солнечного цикла, поэтому общность сделанных выводов оценить трудно. Так как состояние гелиосферы в периоды высокой активности может быстро изменяться, вариации параметров, которые на рис.3 выглядят как гелиоширотные, могут отчасти быть временными вариациями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В периоды низкой солнечной активности значительная поляризация поперечных флуктуаций ММП часового диапазона имела место в пределах зон, где наблюдалась секторная структура ММП (на широтах ниже 30–40°). На более высоких широтах, где ММП было униполярным, поляризация была мала или отсутствовала. Продольная анизотропия флуктуаций, напротив, была высокой в приполярных областях гелиосферы и сравнительно низкой у экватора. Вблизи экватора величина и ориентация поляризации поперечной компоненты флуктуаций по данным *Ulysses* и по измерениям на околоземных орбитах хорошо согласуются; в частности, данными *Ulysses* подтверждается систематическое различие в ориентации поляризации между секторами ММП разного знака, а также изменение ее в связи со сменой знака полярного магнитного поля солнца (22-летний цикл).

В период высокой активности и смены знака полярного магнитного поля Солнца зона с существенной поляризацией поперечных флуктуаций ММП охватывала больший интервал гелиоширот, чем в минимумах активности. Однако в приполярных областях ге-

лиосферы степень поляризации была незначительной, даже при наличии там выраженной секторной структуры. Величина продольной поляризации изменялась с широтой довольно нерегулярным образом.

Поляризация поперечных флуктуаций ММП, вероятно, связана с поляризацией альвеновских волн, которые играют важную роль в динамике межпланетной среды [2,3,5]. Широтная зависимость поляризации с максимумом в приэкваториальной зоне, а также различие ее ориентации в секторах ММП разного знака, возможно, связаны с наличием градиентов параметров солнечного ветра и магнитного поля вблизи гелиосферного токового слоя, которые влияют на условия распространения альвеновских волн [4].

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН – ДВО РАН 09-II-CO-02-002.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Ерофеев Д.В. Поляризация низкочастотных альвеновских волн в межпланетном пространстве // Солнечная активность и ее влияние на Землю, вып. 11. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 36-51.
3. 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.
4. Lyatsky W., Tan A., Lyatskaya S. Effect of Sun's magnetic field polarity on interplanetary magnetic field Bz // Geophys. Res. Lett. V. 30. No 24. 2003. P. 2258.
5. Tu C.-Y., Marsch E. MHD structures, waves, and turbulence in solar wind: observations and theories. // Space Sci. Rev. V. 73. 1995. P. 1-210.
6. <http://helio.estec.esa.nl/ulysses/>
7. ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/