

## ИЗУЧЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ (20 - 40 МИН.) КОЛЕБАНИЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Обридко В.Н., Фельдштейн Я.И., Шельтинг Б.Д. Варфоломеева Н.Г.

### I. Введение

Спектр неоднородностей межпланетного магнитного поля (ММП) является важной характеристикой межпланетной среды и солнечного ветра (СВ). Знание его необходимо как для непосредственного расчета распространения возмущений от Солнца, так и для расчета диффузии солнечных космических лучей на пути от Солнца к Земле. Информация о спектре неоднородностей ММП имеет и прямое прогностическое значение, так как они непосредственно воздействуют на магнитосферу Земли.

Природа неоднородностей ММП пока не ясна. Это могут быть отдельные плазменные сгустки, явления типа "транзиентов", турбулентные явления разных масштабов. Возможна волновая природа этих неоднородностей - распространяющиеся от Солнца МГД - волны разных типов. Неясны источники этих неоднородностей. С одной стороны, они могут возникать в процессе распространения от Солнца, с другой стороны, они могут генерироваться часто встречающимися на Солнце квазипериодическими колебаниями локального [1 - 3] или глобального [4] характера. На Солнце встречаются периоды ~ 2 - 3 мин, 5 мин, 20 мин, 50 мин, 160 мин.

Особенно интересно изучение спектра неоднородностей ММП в возмущенные периоды. В некоторых работах установлено, что характер квазипериодических колебаний на Солнце меняется с изменением активности [5, 6] и это свойство может быть использовано для прогноза.

Для изучения спектра неоднородностей ММП необходимы наблюдения ММП с временным разрешением лучше 1 минуты. Среди более ранних работ отметим работу Бурлаги [7], где анализировался спектр неоднородностей ММП, но не выявлены какие-либо локальные максимумы в спектре в диапазоне 3 - 60 минут. Бурлага обратил внимание на некоторые изменения наклона спектра в возмущенные периоды и соотношения мощности спектра неоднородностей по разным компонентам ММП при вариациях уровня активности.

### 2. Наблюдательный материал и математический аппарат.

В настоящей работе были использованы записи всех компонент ММП, полученные на спутниках *Explozet* 33 и 34 с временным разрешением 5 сек. При получении спектров мощности использовались

формулы статистического анализа для дискретной случайной величины. Статистический анализ включал в себя вычисление корреляционных и спектральных функций, являющихся Фурье-преобразованием от корреляционных функций. В анализе использовался метод Тьки [8 - 10]. Корреляционные и спектральные функции вычисляются по следующим формулам:

$$B_{\mu}(\ell) = \frac{\frac{1}{N-\ell+1} \sum_{i=0}^{N-\ell} (\mu_{x_i} - \bar{\mu})(\mu_{x_{i+\ell}} - \bar{\mu})}{\frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N (\mu_{x_i} - \bar{\mu})^2} \quad (1)$$

$$S_{\mu}(k) = \frac{1}{m} \sum_{\ell=0}^m B_{\mu} \left(1 + \cos \frac{\pi \ell}{m}\right) \cos \frac{k \pi \ell}{m} \quad (2)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, m$$

где  $N$  - число дискретных точек в записи (реализации),  $\ell$  - временной сдвиг,  $m = \ell_{\max}$ .

Мы рассмотрели ряд временных интервалов в течение 1968 года в окрестности трех вспышек (см. таблицу ): спокойные временные интервалы; временные интервалы, следующие непосредственно за вспышкой; временные интервалы, совпадающие с геомагнитными возмущениями. Это дает возможность проследить, как меняется характер спектров мощности колебаний межпланетного магнитного поля в разные моменты возмущенности. В таблице приведены собственные периоды в спектрах мощности колебаний компонент вектора магнитного поля для всех реализаций, исследованных нами. Подчеркнуты особо достоверные периоды (для установления достоверности максимумов в спектрах мощности мы использовали 60% - ные доверительные интервалы). На рис. I показаны спектры мощности колебаний всех компонент ММП для реализаций, полученных 9 июня 1968 г.

3 апреля 1968 г. на Солнце произошла вспышка класса 2 . Согласно работе [II] эта вспышка была классифицирована как изолированная (временной интервал между данной вспышкой и последующей или предыдущей не меньше 2.5 суток). Приблизительно через час после регистрации вспышки в  $H\alpha$  в межпланетной среде обнаружены протоны. Более чем через сутки (5 апреля около 13<sup>h</sup>) началась геомагнитная буря, продолжавшаяся около суток. Это протонное событие и последовавшую за ним магнитную бурю К.Г.Иванов считает

Сведения о всплывках	Реализации											
	I			II			III			IV		
	Вх	Ву	Вз	Вх	Ву	Вз	Вх	Ву	Вз	Вх	Ву	Вз
3 апреля 05 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup> ЦТ	3 апреля 0 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> - 6 <sup>h</sup> 29 <sup>m</sup>	3 апреля 6 <sup>h</sup> 47 <sup>m</sup> - 12 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>	3 апреля 12 <sup>h</sup> 24 <sup>m</sup> - 17 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>	3 апреля 17 <sup>h</sup> 27 <sup>m</sup> - 24 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>								
15 N 50 W 2 N	22 44 10 22 12	14 19 8 15 6	22 19 15 8 8	19 22 8 15 8	15 15 8 8 6	19 22 8 15 8	22 19 15 8 8	15 15 8 8 6	22 19 15 8 8	17 22 7 12 12	22 17 7 12 12	22 17 7 12 12
5 апреля 13 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup> - 18 <sup>h</sup> 01 <sup>m</sup>	5 апреля 18 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> - 0 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>	5 апреля-6 апреля 18 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> - 0 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>	6 апреля 0 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> - 7 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup>	6 апреля 7 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> - 13 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>								
22 18 12 12	19 18 8 8	22 19 7 7 4	17 12 10 7 7	19 17 12 12 12	18 18 7 7 4	17 12 10 7 7	19 17 12 12 12	18 18 7 7 4	19 17 12 12 12	12 12 6 6 4	17 12 12 12 6 6 4	19 12 19 12 6 6 4
9 июня 08 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup> ЦТ	8 июня-9 июня 21 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup> - 4 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup>	9 июня 9 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> - 16 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup>	9 июня - 10 июня 23 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> - 5 <sup>h</sup> 53 <sup>m</sup>	10 июня - 11 июня 21 <sup>h</sup> 34 <sup>m</sup> - 4 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>								
15 S 8 N 4B	36 36 40 14	36 20 11 5	20 40 7 6	25 44 11 33 11	40 40 6 6 6	20 40 7 6	25 44 11 33 11	40 40 6 6 6	25 44 11 33 11	40 40 11 11 11	44 33 11 11 11	40 40 11 11 11
30 октября 23 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup> ЦТ	30 октября 15 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> - 23 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>	31 октября 0 <sup>h</sup> 34 <sup>m</sup> - 8 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup>	1 ноября 8 <sup>h</sup> 47 <sup>m</sup> - 17 <sup>h</sup> 53 <sup>m</sup>									
14 S 37 W 4B	40 50 22 18 10 12	33 18 18 18 12 12	40 20 11 33 11	20 33 11 22 22	33 18 18 18 12 12	40 20 11 33 11	20 33 11 22 22	33 18 18 18 12 12	40 20 11 33 11	20 33 11 22 22	33 18 18 18 12 12	22 22 12 12 12 12

следствиями вспышки 3 апреля. В то же время в каталоге Швестки - Симона [12] это событие рассматривается как модуляционный эффект, связанный с усилением яркой области в центре диска Солнца. В протонном отношении событие было слабым: поток протонов с энергией  $> 10$  MeV составлял  $\sim 0,1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ .

Изучены спектры мощности для 8 реализаций: первые четыре следующие непосредственно друг за другом реализации по времени занимают целые сутки с  $0^{\text{h}} 17^{\text{m}}$  по  $23^{\text{h}} 59^{\text{m}}$  3-го апреля; последние четыре реализации также следуют непосредственно друг за другом и занимают целые сутки: с  $13^{\text{h}} 18^{\text{m}}$  5-го апреля по  $13^{\text{h}}$  6-го апреля. Реализация I 3-го апреля включает предвспышечный интервал времени и время собственно оптической вспышки. Реализация II 3-го апреля начинается с момента прихода быстрых частиц в околоземное пространство. Реализации I - IV 5-го апреля по времени совпадают с геомагнитной бурей. Во всех реализациях наиболее интенсивными являются периоды 20 - 40 мин, причем лучше всего они проявляются в реализациях I - IV 5-го апреля, протекающих одновременно с геомагнитной бурей. Как правило, колебания сильнее в спектрах мощности компонент, чем модуля магнитного поля.

9 июня и 30 октября 1968 года были зафиксированы две мощные протонные вспышки класса 4B. Согласно работе [11] эти вспышки не являются изолированными, что затрудняет их анализ. (Между вспышкой 30 октября и предыдущей и последующей взаимодействие среднее  $\gamma \sim 60^\circ$ , между вспышкой 9 июня и предыдущей взаимодействие сильное  $\gamma = 24^\circ$ , а между этой вспышкой и последующей - среднее  $\gamma \sim 50^\circ$ ). Протонные события 9 июня и 30 октября определенно связаны с этими вспышками и были довольно сильными (поток протонов больше 100).

Для события 9 июня реализация I соответствует спокойному предвспышечному интервалу времени, реализация II - времени прихода быстрых частиц, реализация III - началу возмущения, реализация IV - внезапному началу (SC) и главной фазе геомагнитной бури.

30 октября реализация I также соответствует спокойному предвспышечному интервалу времени, реализация II - приходу быстрых частиц, реализация III - геомагнитной буре.

Основные периоды в спектрах мощности колебаний ММП заключены в интервале 15 - 40 мин, причем видно, что интенсивность максимумов в спектрах растет от спокойного интервала времени к возмущенному (см. рис.1). Колебания сильнее в спектрах мощности компонент поля, чем в спектрах мощности модуля магнитного поля.

### 3. Обсуждение результатов.

Из полученных нами спектров (см. рис. I и табл. ) видно, что выделенных периодов  $\sim 5$  минут в спектре мощности MMI нет. Отчетливо видны периоды 20 - 40 минут, согласующиеся с периодами, обнаруженными М.М.Кобриным [3, 5], однако у нас нет оснований настаивать на их прямом солнечном происхождении. Выделенные периоды в этом диапазоне хорошо видны как до вспышки, так и во время ее. При приходе быстрых частиц мощность периодов в этом диапазоне иногда даже несколько падает и затем резко усиливается к моменту начала геомагнитной бури.

Мощность колебаний компонент поля всегда значительно выше, чем мощность колебаний модуля. Это указывает на преобладание альвеновских волн в ансамбле волн, приходящих с солнечным ветром, поскольку в альвеновской волне модуль поля не меняется. К такому же выводу пришел Бурлага [7]. Однако в возмущенные периоды это соотношение несколько меняется. Мощность колебаний модуля становится сравнимой по величине с мощностью колебаний компонент (см. рис. I).

Это становится особенно отчетливо заметно при анализе усредненных характеристик спектра ("непрерывный спектр"). На рис. 2 показаны сглаженные ( $\Delta t = 20$  сек) спектры мощности колебаний одной из компонент поля ( $B_x$ ) и модуля магнитного поля для двух реализаций, рассмотренных в связи со вспышкой 3 апреля 1968 г.: реализация I - спокойный интервал времени и реализация У - начало геомагнитной бури. По оси абсцисс отложены логарифмы частоты ( $\lg f$  Гц), по оси ординат - логарифмы спектральной плотности колебаний поля ( $\lg S^2 / \text{Гц}$ ). Видно, что мощности спектров колебаний поля растут от предвспышечного интервала к послевспышечному, причем для разных компонент этот рост неодинаков. Быстрее всех увеличивается интенсивность спектров модуля поля. Если в реализациях, соответствующих спокойным интервалам времени, спектр модуля расположен гораздо ниже спектров компонент, то в реализациях, соответствующих возмущенным интервалам времени, он становится сравнимым с ними. По-видимому, к началу геомагнитной бури происходит постепенная трансформация магнито-гидродинамических колебаний типа альвеновских волн в более сложные типы волн. Этот результат о сближении мощностей колебаний компонент и модуля поля в возмущенные периоды не согласуется с выводами Бурлаги [7], который пришел к выводу об усилении относительной роли альвеновских волн во время возмущений. Полученный нами результат кажется физически более оправданным.

Не совсем согласуются с выводами Бурлаги и характеристики на-

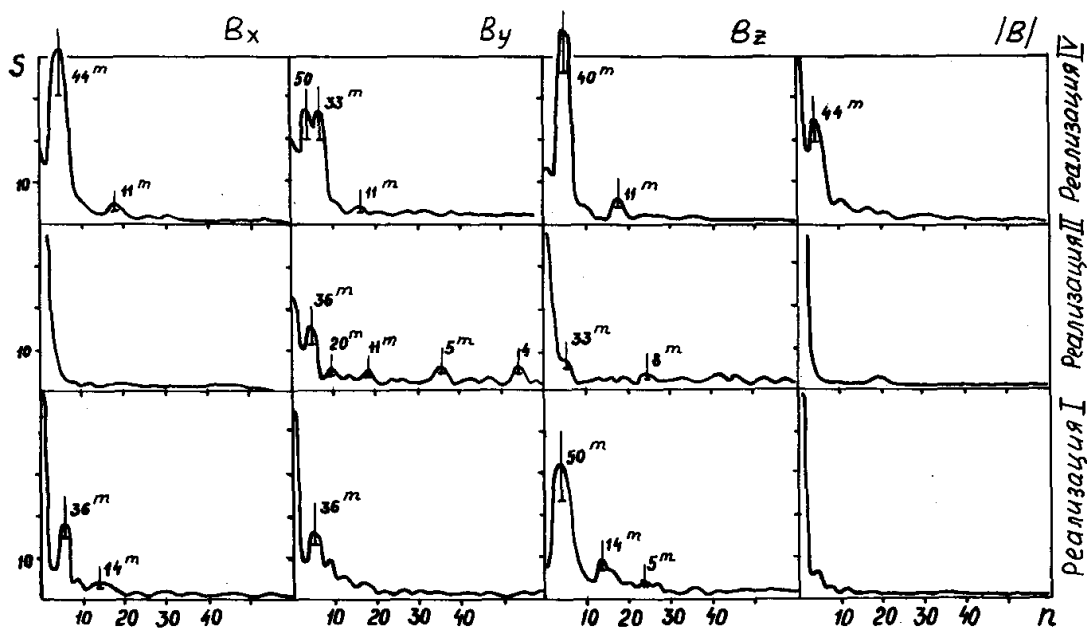
клона усредненного спектра. В работе [7] в спокойный период наклон спектра для модуля поля  $|B|$  составляет 1,6, а в возмущенный 1,37. В нашем случае наклоны обычно меньше этих величин. Они составляют последовательно по реализациям 3 апреля - 0,7, 0,6, 1,1, 0,7; 5 апреля - 1,6, 1,0, 1,2, 1,2; 9 июня - 1,5, 0,5, 0,7, 1,2; 30 октября - 1,1, 1,7, 0,7. Таким образом, трудно указать типичный характер изменения от невозмущенного состояния к возмущенному.

Несовпадение некоторых наших результатов с результатами работы [7] возможно связано с тем, что в работе [7] анализируются данные Маринера 4 для глубокого минимума с 7 декабря 1964 г. по 2 января 1965 г. [13]. Возможно, в 1968 году межпланетная среда была в целом сильно возмущена и периоды, которые мы считали "спокойными", были скорее возмущенными в терминологии работ [7, 13]. Этот вопрос нуждается в дополнительном рассмотрении. Интересно, что в области частот  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  Гц часто имеет место излом спектра. Так, 9 июня наклон 2,0 в области частоты  $3 \cdot 10^{-4}$  резко меняется на наклон 0,65 (см. рис.2). Зависимость этого эффекта от степени возмущенности межпланетной среды пока не ясна.

#### Л и т е р а т у р а

1. Leighton R.B., Noyes R.W., Simon G.W. Velocity fields in the solar atmosphere. I. Preliminary report. *Astrophys.J.*, 1962, vol.135, N 2, 474
2. Могилевский Э.И., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Спектр низкочастотных колебаний магнитного поля солнечных пятен и низкочастотная модуляция радиоэмиссии активных областей Солнца. *Известия ВУЗ-ов, Радиофизика*, 1973, т.16, 1357
3. Кобрин М.М. О некоторых перспективах исследования Солнца путем изучения квазипериодических компонент флуктуаций радиоизлучения. - В сб.: Доклады сессии Научного Совета по комплексной проблеме "Радиоастрономия" (ИЗМИРАН, 13 - 16 октября 1970). М., 1972, 27
4. Северный А.Б., Котов В.А., Цап Т.Т. Колебания Солнца и проблема его внутреннего строения. - *Астрон.Ж.*, 1979, т.56, вып.6, 1137
5. Кобрин М.М., Быстров М.В., Снегирев С.Д. Квазипериодические пульсации магнитного поля Земли с периодами 20 - 200 мин и их связь с аналогичными пульсациями в радиоизлучении Солнца перед протонными вспышками. - *Геомагнетизм и Аэрономия*, 1979, т.19, № 2, 306

6. Шельтинг Б.Д. Диссертация. М. ИЗМИРАН, 1978
7. Burlaga L.F. Microstructure of the interplanetary medium. In: solar wind, 1972, 309
8. Blackman R.B., Tukey I.W. The measurement of power spectra from the point of view of Communications Engineering. Dover, New York, 1958
9. Шельтинг Б.Д., Обридко В.Н. Исследование периодических пространственных структур в магнитном поле в солнечной атмосфере. - Препринт ИЗМИРАН, 1973, № 19
10. Шельтинг Б.Д., Обридко В.Н. Исследования квазипериодических пространственных структур в магнитном поле и лучевых скоростях в солнечной атмосфере. - В сб.: Физика Солнца. М.: Наука, 1979, 62
11. Иванов К.Г., Микерина Н.В., Завойкина А.И., Трещеткина В.М. Каталог вспышечных ситуаций 1966 - 1974 гг. применительно к межпланетным и магнитосферным возмущениям. М.: ИЗМИРАН, 1979
12. Katalog of solar particle events 1955-1969, ed. by Z.Švestka and P.Simon. Astrophys. Space Library, 1975
13. Siscoe G.L., Davis L.Jr., Coleman P.I.Jr., Smith E.J., Jones D.E.. Power spectra and discontinuities of the interplanetary magnetic field: Mariner % 4. J.Geophys. Res., 1968, vol. 73, N 1, 61



61

Рис. 1

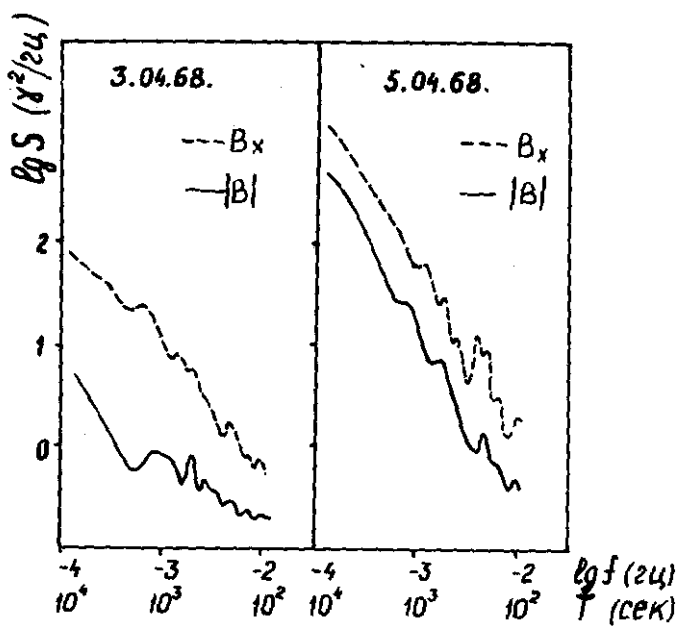


Рис. 2