

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 537.591.5

**ПРОТОНЫ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПЕРИОДЫ
ИНВЕРСИИ ПОЛЯРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА****И. В. Гецелев, В. П. Охлопков, Е. А. Чучков**

(НИИЯФ)

E-mail: okhlopkov@taspd.sinp.msu.ru

Анализируется поведение регистрируемых на орбите Земли энергичных протонов солнечных космических лучей до, в период и после инверсии полярного магнитного поля Солнца в 21, 22 и 23-м одиннадцатилетних циклах солнечной активности. Во всех циклах обнаружены длительные (около года) понижения флюенсов почти на порядок величины, совпадающие по времени с инверсией, и существенное уменьшение жесткости энергетического спектра протонов солнечных космических лучей, что может служить дополнительным индикатором инверсии полярного магнитного поля Солнца.

Введение

Изучение особенностей поведения солнечных космических лучей (СКЛ) в связи с различными проявлениями солнечной активности (СА) представляют несомненный научный и практический интерес и является предметом многолетнего внимания научной общественности.

Одним из наиболее известных и давно изучаемых является одиннадцатилетний цикл СА, отчетливо проявляющий себя и в характеристиках космических лучей в межпланетном пространстве. Принято различать физические процессы, протекающие в периоды максимумов этого цикла СА.

В настоящей работе анализируется поведение энергичных солнечных протонов, измеренных на орбите Земли вне магнитосферы в период инверсии полярного магнитного поля Солнца (ПМП), которая происходит вблизи максимума солнечной активности и приблизительно совпадает (но не в каждом цикле) по времени с локальным минимумом в открытой Гневышевым [1] двухпиковой структуре эпохи максимума цикла СА. Инверсия возникает в результате взаимодействия между крупномасштабным глобальным ПМП и локальными магнитными полями Солнца (поля "королевской" зоны, т. е. $< 55^\circ$ солнечной широты), имеющими примерно противофазный ход в цикле СА. При этом глобальная перестройка магнитного поля проявляет себя в поведении всех слоев солнечной атмосферы, что, по-видимому, должно сказаться на процессах генерации и распространения СКЛ в гелиосфере в целом вследствие переноса магнитного поля источника солнечным ветром. Поэтому целесообразно выявить особенности во временном ходе потоков и флюенсов протонов СКЛ, сопоставляя с данными по северному и южному ПМП, солнечной активности (число солнечных пятен R_z), общему магнитному полю Солнца (ОМП) и межпланетному магнитному полю (ММП).

Использованные данные

В качестве исходных данных для расчета флюенсов использовались результаты измерений потоков протонов с энергиями более 1, 2, 4, 10, 30 и 60 МэВ, зарегистрированные на космических аппаратах IMP-8 на орбите Земли в период с 1973 по 2001 г. [2]. Также были использованы данные по R_z [3], общему (среднему по терминологии [4]) магнитному полю Солнца как звезды [4], измеренному на орбите Земли модулю ММП [2], сглаженные значения (убрана годовая волна) северного (N) и южного (S) полярного магнитного поля Солнца ($> 55^\circ$ солнечной широты) [4]. Эти данные усреднялись за полугодовые интервалы, а флюенсы рассчитывались как за полугодовые интервалы, так и за три месяца. Для выделения потока протонов СКЛ было выполнено вычитание фоновых значений потоков на уровне $1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}$. При этом погрешности в оценке суммарных за время наблюдения флюенсов протонов СКЛ не превышают нескольких процентов, что вполне допустимо в целях настоящей работы.

Обсуждение

На рис. 1 показаны логарифмы полугодовых флюенсов ($\lg \Phi$) протонов СКЛ с энергиями больше 10 и 30 МэВ (соответственно светлые и заштрихованные столбики, рис. 1, а), полугодовые средние суточные значения числа солнечных пятен (R_z , рис. 1, б), модуля общего магнитного поля Солнца как звезды (рис. 1, в), полугодовые средние значения измеренного на орбите Земли модуля межпланетного магнитного поля (рис. 1, г), сглаженные значения северного (N) и южного (S) полярного магнитного поля Солнца. Вверху всех рисунков горизонтальным отрезком показаны периоды инверсии ПМП в соответствии с данными рис. 1, д.

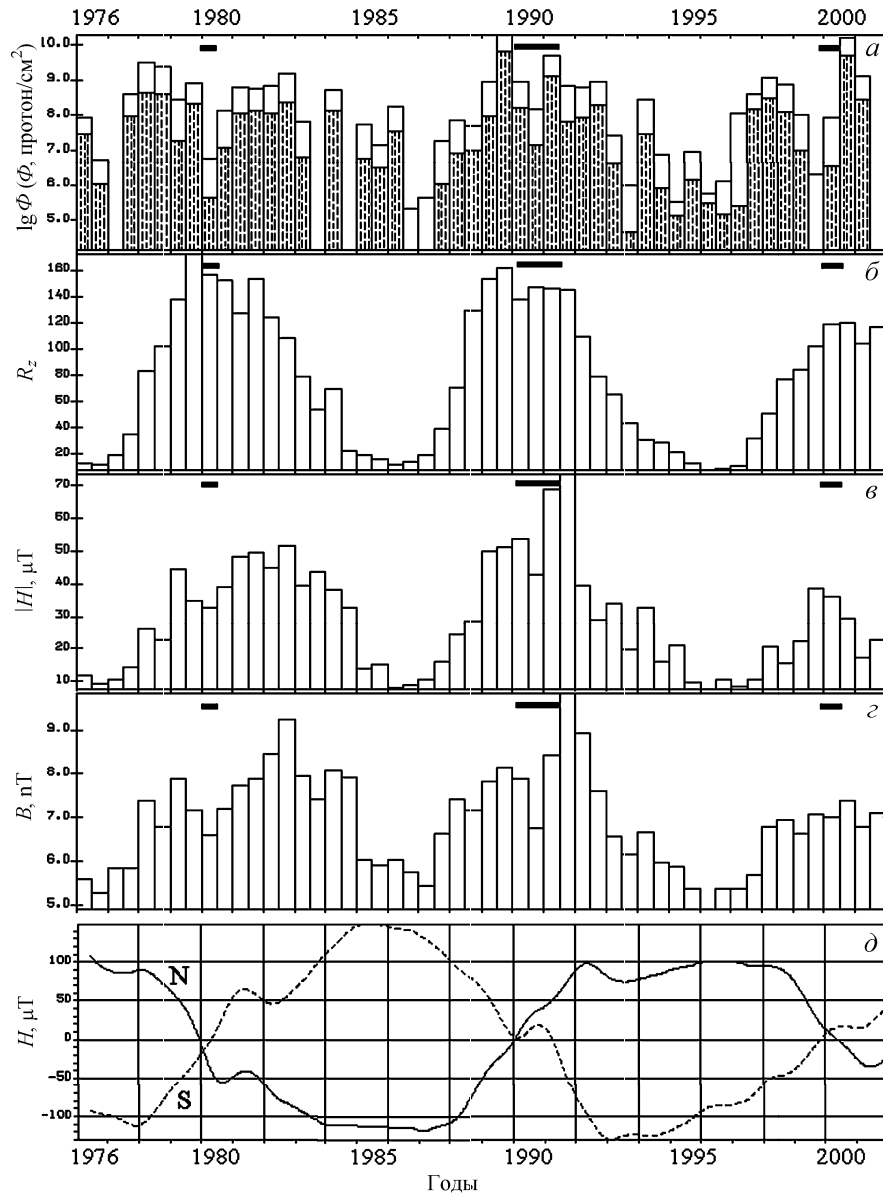


Рис. 1. (а) логарифмы полугодичных флюенсов ($\lg \Phi$) протонов СКЛ с энергиями более 10 и 30 МэВ (соответственно светлые и заштрихованные столбики), (б) полугодичные средние значения числа солнечных пятен (R_z), (в) полугодичные средние модуля общего магнитного поля Солнца как звезды (ОМП), (г) полугодичные средние значения измеренного на орбите Земли модуля межпланетного магнитного поля (ММП), (д) сглаженные значения северного (N) и южного (S) полярного магнитного поля Солнца (ПМП). Вверху всех рисунков горизонтальным отрезком показаны периоды инверсии ПМП

В таблице за периоды 1979–1981 гг., 1989–1991 гг. и 1998–2000 гг. представлены: среднегодовые значения солнечного вспышечного индекса (СВИ) [5] и годовые количества солнечных протонных событий (СПС) для протонов с энергией > 10 МэВ и амплитудой в максимуме > 10 протонов/см²·с·ср, зарегистрированные на орбите Земли [6].

Анализ рис. 1 и таблицы показывает следующие особенности солнечных и межпланетных параметров в период инверсии ПМП по сравнению с прилегающими периодами.

Во всех трех рассматриваемых циклах СА (21–23, рис. 1, а) в период инверсии ПМП существуют отчетливые понижения флюенсов протонов СКЛ пример-

Среднегодовые значения солнечного вспышечного индекса и годовые количества СПС на орбите Земли

Цикл СА	Год	СВИ	СПС
21	1979	16.2	7
	1980	17.1	2
	1981	17.1	10
22	1989	17.4	23
	1990	12.2	12
	1991	15.1	17
23	1998	4	8
	1999	6.4	5
	2000	10.5	12

но на порядок величины по сравнению с сопоставимыми прилегающими периодами, и эти понижения практически не зависят от энергии протонов в диапазоне энергий больше 10 и 30 МэВ. Это, кстати, справедливо и для протонов меньших энергий (> 1 , > 2 , > 4 МэВ) [2]. В годовых флюенсах понижения проявляются еще более отчетливо.

Понижение флюенсов (рис. 1, а) неплохо совпадает с локальным минимумом в максимуме солнечной активности (Rz) для 21 и 22-го циклов СА (1980 г. и 1990 г.) и опережает примерно на полгода первый максимум активности СА в 23-м цикле.

Во временном ходе полугодового среднего значения модуля магнитного поля Солнца как звезды (рис. 1, в) имеется совпадающее с периодом инверсии ПМП локальное (около года) понижение ($\sim 20\%$) в 21 и 22-м циклах (1980 г. и 1990 г.) и относительно слабая реакция на инверсию ПМП в 23-м цикле (1999 г.)

Во временном ходе модуля межпланетного магнитного поля в районе Земли во всех трех циклах (рис. 1, г) отчетливо видны локальные понижения ($\sim 20\%$), довольно хорошо совпадающие с уменьшением флюенсов протонов СКЛ в период инверсии ПМП.

Следует заметить, что на спаде 21 и 22-го циклов (1983 г. и 1993 г.) имеют место аналогичные по длительности и амплитуде локальные неизвестного происхождения понижения флюенсов протонов, и это заслуживает специального исследования. Эти понижения примерно на полгода-год отстают по фазе от максимума общего магнитного поля Солнца как звезды. Возможно, это каким-то образом связано также с известной двухлетней вариацией активности в ходе цикла.

Как видно из таблицы, среднегодовые суточные значения солнечного вспышечного индекса имеют заметное локальное понижение ($\sim 15\%$) лишь в одном (22-м) из трех рассматриваемых циклов СА, но для количества протонных событий в межпланетном пространстве в период инверсии ПМП (1980, 1990, 1999 гг.) понижение наблюдается отчетливо. Это наводит на мысль о том, что в период инверсии ПМП относительно подавлена не столько вспышечная активность Солнца, сколько мощность процесса генерации протонов высоких энергий солнечными источниками или затруднен процесс распространения протонов СКЛ в межпланетном пространстве.

Весьма важно изучение изменений энергетического спектра протонов СКЛ в периоды инверсий ПМП. Для аппроксимации спектра использовались степенные функции.

На рис. 2 показаны некоторые примеры аппроксимации степенными функциями распределений по энергии трехмесячных флюенсов протонов СКЛ. Как видно из данных рис. 2, погрешности аппроксимации не превышают нескольких процентов.

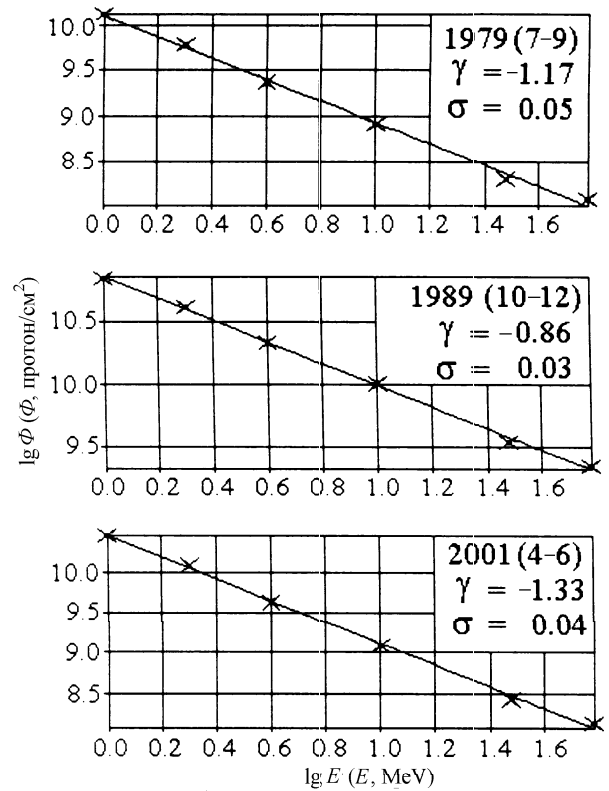


Рис. 2. Примеры аппроксимации энергетических спектров трехмесячных флюенсов протонов СКЛ с энергиями больше 1, 2, 4, 10, 30, 60 МэВ степенной функцией. В скобках указаны: год, месяцы, по которым проводилось суммирование флюенсов, среднеквадратичные ошибки (в логарифмах флюенса)

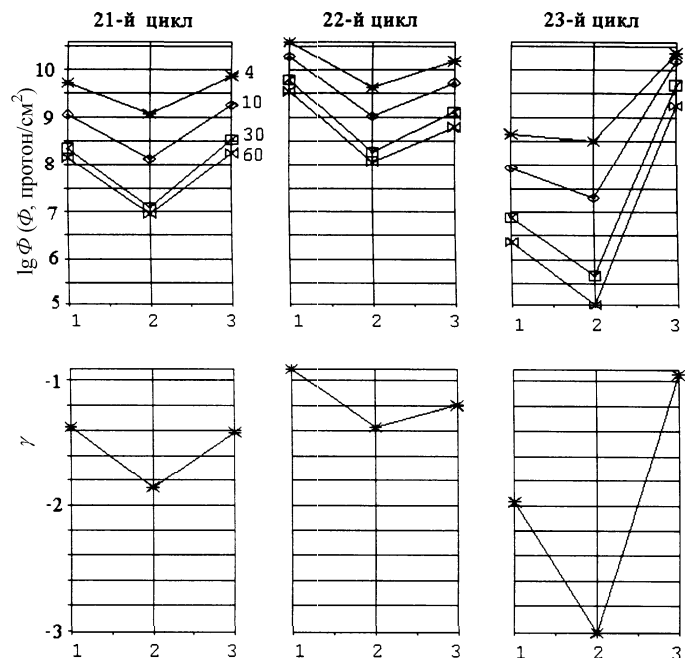


Рис. 3. Логарифмы флюенсов протонов СКЛ ($\lg \Phi$) с энергиями более 4, 10, 30 и 60 МэВ и значения показателей их интегрального степенного энергетического спектра (γ) в периоды до, во время и после переполусовок ПМП (соответственно точки 1, 2 и 3) в 21, 22, 23-м циклах СА

На рис. 3 показаны логарифмы флюенсов протонов СКЛ ($\lg \Phi$) с энергиями более 4, 10, 30 и 60 МэВ и значения показателей их интегрального степенного энергетического спектра (γ) в период до, во время и после переполюсовок ПМП (соответственно точки 1, 2 и 3). Из этого рисунка четко видно, что энергетический спектр в периоды переполюсовок существенно мягче и что особенно большой по величине скачок флюенсов и показателя спектра происходит после переполюсовки в 23-м цикле.

Заключение

1. Процесс инверсии полярного магнитного поля Солнца отчетливо отражается в межпланетном пространстве на крупномасштабном поведении флюенсов солнечных протонов с энергией от единиц до десятков МэВ и их энергетических спектров. Это проявляется в совпадающем по фазе и сопоставимом по длительности с инверсией ПМП глубоком понижении флюенсов солнечных протонов примерно на порядок по сравнению с сопоставимыми прилегающими периодами и существенном уменьшении жесткости энергетических спектров.

2. Явное совпадение инверсии ПМП с крупномасштабным понижением флюенсов протонов СКЛ в межпланетном пространстве в свою очередь дает основание полагать, что достаточно длительное (око-

ло года) и глубокое (почти на порядок величины) понижение флюенса протонов СКЛ в эпоху максимума цикла СА (или близко к нему) может служить дополнительным к наблюдательным солнечным данным индикатором инверсии ПМП.

3. На ветви спада цикла СА примерно через два года после эпохи максимума имеют место неизвестного происхождения крупномасштабные (около года) понижения (почти на порядок величины) флюенсов протонов СКЛ; они появляются примерно через год после максимума значения модуля общего магнитного поля Солнца как звезды. Это явление, безусловно, заслуживает специального исследования.

Литература

1. *Gnevyshev M.N.* // Solar Physics. 1967. **1**. С. 107.
2. <http://nssdc.gsfc.noaa.gov/omniveb/ow.html>
3. <http://www.ngdc.noaa.gov>
4. <http://quake.stanford.edu/wso/%wso.html>
5. ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_FLARE/INDEX/
6. <http://www.sec.noaa.gov/ftpd/indices/SPE.txt>

Поступила в редакцию
26.09.02

Переработана
04.11.03