

УДК 551.590.02

Г.С. МИНАСЯНЦ, Т.М. МИНАСЯНЦ

ДИАПАЗОН ЭНЕРГИЙ ЧАСТИЦ, УСКОРЕННЫХ НА МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

На основе данных спутниковых и наземных наблюдений, проведено изучение энергетических свойств дифференциальных потоков протонов, ускоренных на ударном фронте корональных выбросов массы. В течение 23 цикла солнечной активности выявлено 4 экстремальных случая, когда диапазон энергий ускоренных протонов простирался от значений в десятки keV до сотен MeV. Установлено, что такое эффективное ускорение протонов связано с присутствием на ударном фронте сильных магнитных полей: $|B| > 55 \text{ нТ}$.

Согласно современным представлениям, причиной ускорения частиц на Солнце, могут быть: параллельные электрические поля в районах магнитного пересоединения, стохастическое ускорение плазменными волнами и турбулентностью, и движущиеся ударные волны [1]. Процессы ускорения частиц могут происходить как при развитии вспышек и корональных выбросов массы (КВМ) во внутренней гелиосфере так и при дальнейшем распространении частиц в межпланетном пространстве, включая атмосферу Земли.

Причем эффективность ускорения частиц на ударных волнах оказывается различной для каждого типа волновых возмущений [2]. Для околоземной головной ударной волны, которая образуется и постоянно существует благодаря динамическому давлению спокойного солнечного ветра на атмосферу Земли, диапазон энергий ускоренных частиц, в частности протонов, составляет значения от тепловых энергий до сотен keV. На межпланетных ударных волнах частицы ускоряются до энергий 0.1-1 MeV. Самые энергичные частицы 0.1-1 GeV образуются во внутренней короне на ударном фронте, который формируется в процессе взрывного развития быстрых узконаправленных КВМ.

В литературе описан случай уникального ускорения на ударном фронте КВМ протонов до энергий 700 MeV в событии 4-6 ноября 2001 г.[3], что существенно превышает принятые ранее значения.

Используя многочисленные наблюдательные данные, полученные на спутниках в течение 23 цикла солнечной активности (1997-2007 г.г.), нами проведено статистическое исследование интервалов энергий протонов, ускоренных на фронтах межпланетных ударных волн.

Рассматривались вспышки, которые являлись источниками усиления интегральных потоков протонов до энергий $E_p > 10 \text{ MeV}$. При этом протонные вспышки сопровождались КВМ, с движущимися перед ними фронтами ударных волн. Приход фронта ударной волны характеризовался резким скачком значений параметров солнечного ветра: скорости, плотности, температуры и напряженности магнитного поля.

Конечно, в первую очередь, мы предполагали выявить случаи экстремально высоких значений энергий ускоренных протонов. Проведенное исследование показало, что для четырех событий: 4 - 6 ноября 2001 г., 22-24 ноября 2001 г., 18-20 ноября 2003 г., 13-15 мая 2005 г. можно с уверенностью говорить об увеличении потоков протонов до энергий в несколько сотен MeV. Причем значения интенсивности потоков на ударном фронте превышали соответствующие значения интенсивности для периода взрывной фазы развития вспышек (см. рис. 1-2).

Сопоставляя для этих событий параметры вспышек, солнечного ветра, корональных выбросов массы, необходимо отметить следующее:

1. По максимуму рентгеновского излучения в (1-8)Å лишь вспышка 4 ноября 2001 г. относится к классу X (X1 - strong), остальные – классом ниже (от M3 до M9 – moderate). Т.е. по этому показателю вспышки являются, в основном, средними по мощности.

2. Корональные выбросы массы имели довольно высокие линейные скорости как в процессе их развития вблизи Солнца (1220 - 1810) км/сек, так и вблизи Земли: (700 - 950) км/сек. Время движения ударного фронта от Солнца до Земли составляло 30h - 48h.

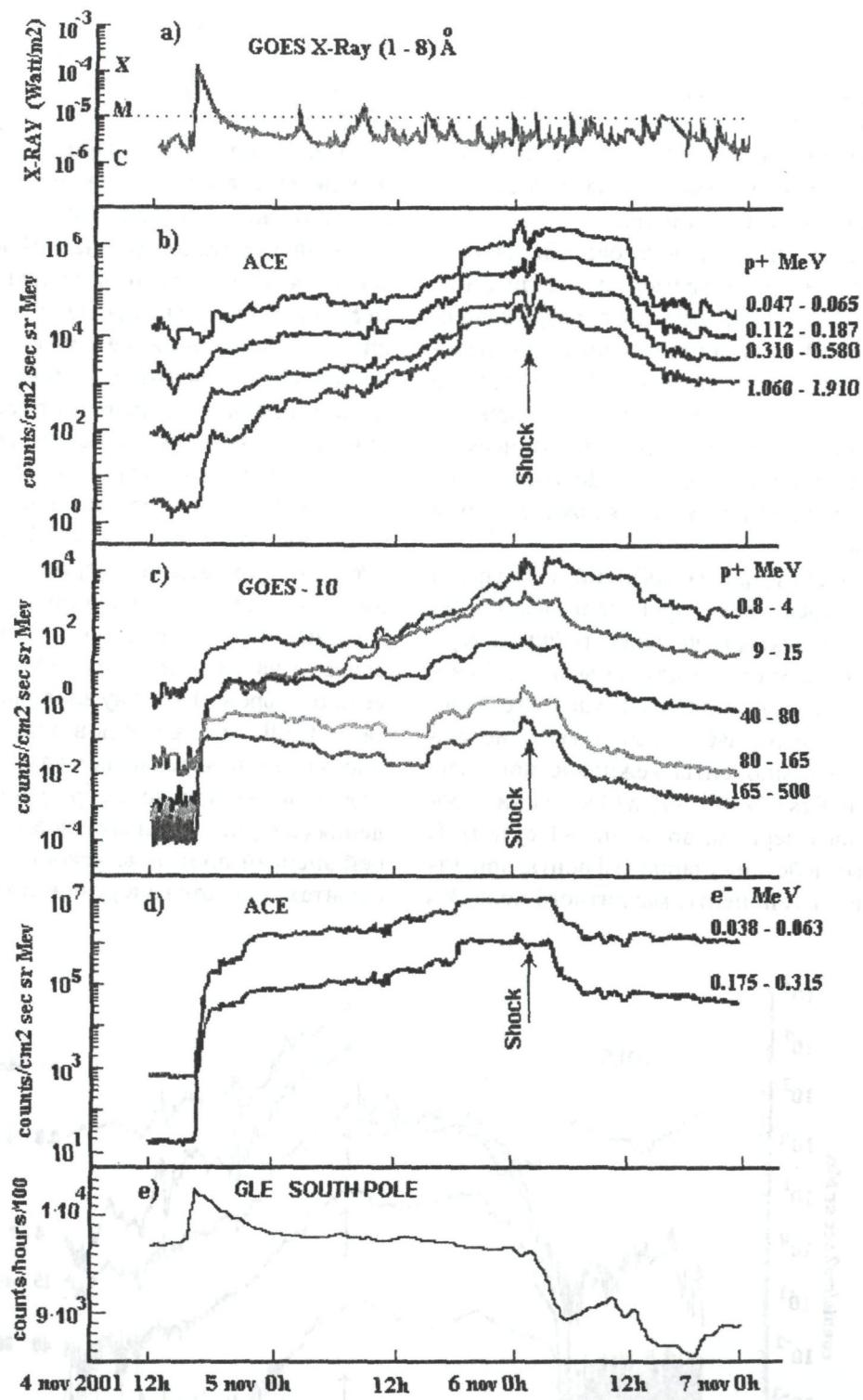


Рис. 1. Характеристики развития события 4 - 6 ноября 2001 г.: а) ход изменения рентгеновского излучения в $\lambda(1-8)$ Å (спутник GOES); б) распределение интенсивности потоков протонов низких энергий (данные спутника ACE); в) распределение интенсивности потоков протонов средних и высоких энергий (спутник GOES); д) распределение интенсивности потока электронов (спутник ACE); е) результаты наблюдений солнечных космических лучей на нейтронном мониторе станции South Pole. Стрелки указывают момент прихода фронта ударной волны. Приподнятые участки профиля интенсивности соответствуют местам ускорения частиц на ударном фронте.

3. Значения напряженности межпланетного магнитного поля $|B|$ на ударном фронте имели скачок от фоновых значений (2-6) нТ до (56-72) нТ. Специально проведенное исследование показало, что это были самые большие значения $|B|$ из всех зарегистрированных на магнитометрах в течение последнего цикла.

Отметим, что нами использовались распределения значений $|B|$ со временем усреднения в 1h (спутник ACE). При временных разрешениях в 3sec и 1min $|B|$ иногда принимает более высокие значения в течение всего 5-10 минут, и не успевают, за такой короткий интервал времени, оказать существенного влияния на физическую структуру окружающей плазмы. Использование значений, усредненных за 1h, является самым оптимальным.

4. Для рассмотренных событий, суммарное влияние геоэффективных процессов вызвало существенную структурную перестройку внутри магнитосферы Земли. Так для события 18-20 ноября 2003 г. в период воздействия ударного фронта на магнитосферу, наблюдались высокие значения южной компоненты межпланетного магнитного поля B_{zs} ($B_{zs}^{\max} = -45$ нТ) в течение продолжительного периода времени (~1 сутки). В результате воздействия ударного фронта, присутствию южной компоненты магнитного поля B_{zs}

и потока ускоренных протонов различных энергиями (от десятков keV до сотен MeV), возникла самая сильная магнитная буря 23 цикла ($Dst = -422$ нТ).

Таким образом, на ударном фронте корональных выбросов массы, при значениях напряженности магнитного поля $|B| > 55$ нТ, наблюдается ускорение протонов до энергий в несколько сотен MeV. Эти величины энергий, по крайней мере, на два порядка превышают соответствующие энергии, принятые ранее. Напряженность межпланетного магнитного поля при его экстремальных значениях, является определяющим параметром для осуществления наиболее эффективного процесса ускорения частиц.

Проанализировано поведение интенсивности солнечных космических лучей ($E_p^{СКЛ} \geq 1$ GeV) в периоды прохождения ударных фронтов. В течение 23-го цикла произошло 16 событий СКЛ. Сильные магнитные поля на ударном фронте рассеивают частицы и препятствуют их проникновению за фронт. Поэтому влияние ударного фронта на СКЛ проявлялось в виде заметных, хотя иногда и незначительных по амплитуде, падений значений интенсивности сразу после его прохождения (см. рис. 1e). Скорее всего, верхней границей энергий протонов, ускоряемых на ударных фронтах, являются энергии в сотни MeV, так как

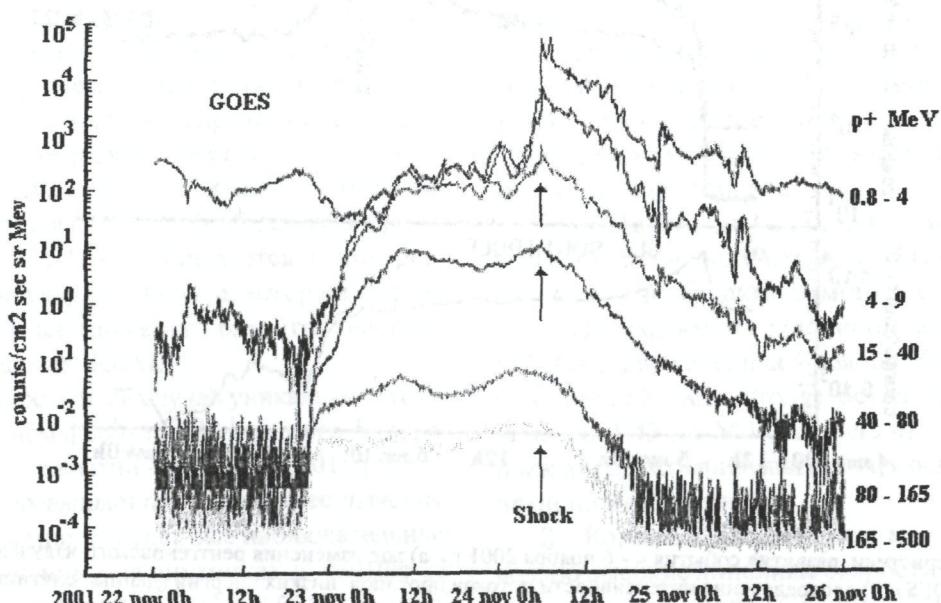


Рис. 2. Изменение интенсивности дифференциальных потоков протонов для события 22-24 ноября 2001 г. (спутник GOES). Момент прихода ударного фронта отмечен стрелками.

не выявлено ни одного случая усиления интенсивности протонов на ударном фронте для СКЛ.

Для протонов меньших энергий ($E_p < 100$ MeV), наблюдалось гораздо больше случаев их ускорения на ударных фронтах. Так за 2001 г. выявлено 12 случаев, когда энергии ускоренных протонов достигали значений 6 MeV, 4 случая - 12 MeV, 2 случая - 30 MeV. В то же время в течение года при прохождении 11 ударных фронтов не отмечено усиления интенсивности потоков протонов. Т.е. присутствие ударного фронта при наличии потоков протонов не всегда приводит к их дополнительному ускорению. И лишь присутствие сильных магнитных полей в области ударного фронта $|B| > 55$ нТ является обязательным условием ускорения протонов вплоть до энергий в сотни MeV.

Работа выполнена в рамках ПФИ, шифр Ф-0351.

ЛИТЕРАТУРА

- Miller J.A. et al., Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares// J. Geophys. Res., 102, 14631, 1997.
- Бережко Е.Г. Ускорение космических лучей ударными волнами в солнечном ветре// Тезисы докладов «Всероссийская конф. по физике солн.-земн. связей» Иркутск, с.44, 2001.
- Кузнецов С.Н., Богомолов А.В., Денисов Ю.И. и др. Солнечная вспышка 4 ноября 2001 г. и ее проявления в энергичных частицах по данным ИСЗ «КОРОНАС-Ф»// Астрон. вестн. Т.37, №2, с. 137-143, 2003.

Summary

Energetic properties of differential fluxes of protons, which were accelerated at the interplanetary shocks, were investigated on the base satellite and ground-based observed data. During the 23-rd cycle of solar activity, the four extreme events were revealed when the accelerated proton energetic range was spread from tens of keV up to hundreds of MeV. It is shown that such an effective acceleration of the protons is connected with the strongest magnetic fields: ($|B| > 55$ nT) which are present at the shock front.

Астрофизический институт
им. В.Г.Фесенкова МОН РК

Поступила 28.04.08 г.

В статье исследованы энергетические свойства дифференциальных потоков протонов, ускоренных в ударных фронтах солнечных вспышек. На основе данных о наблюдении с базовой спутниковой станции и земных радиотелескопов выявлено, что в 23-м цикле солнечной активности произошло четыре сильных события, когда энергия ускоренных протонов варьировалась от десятков киловольт до сотен мегавольт. Для трех из четырех событий было установлено, что ускорение протонов происходит в области сильных магнитных полей, расположенных впереди ударного фронта. Время ускорения протонов в ударных фронтах не всегда совпадает с временем прохождения ударного фронта. Для протонов меньших энергий ($E_p < 100$ MeV) выявлено гораздо больше случаев их ускорения на ударных фронах. Так за 2001 г. выявлено 12 случаев, когда энергии ускоренных протонов достигали значений 6 MeV, 4 случая - 12 MeV, 2 случая - 30 MeV. В то же время в течение года при прохождении 11 ударных фронтов не отмечено усиления интенсивности потоков протонов. Т.е. присутствие ударного фронта при наличии потоков протонов не всегда приводит к их дополнительному ускорению. И лишь присутствие сильных магнитных полей в области ударного фронта $|B| > 55$ нТ является обязательным условием ускорения протонов вплоть до энергий в сотни MeV.

Работа выполнена в рамках ПФИ, шифр Ф-0351.