

реализуется состояние «2». Интервал магнитных полей, в котором происходит указанный переход из состояния «2» в состояние «1», имеет вид

$$\delta H = H_{II} - H_I \cong 2H_N \frac{H_n}{H_n - 2H_E},$$

$$H_n - 2H_E \gg 2(H_n H_N)^{1/2}.$$

При температурах $T \approx 0.1$ К, когда в реальных антиферромагнетиках $\langle I \rangle \approx 1$, интервал $\delta H \approx H_N$ достигает нескольких сотен эрстед. Угол «расщепления» векторов $\langle \mathbf{S}_f \rangle$, $\langle \mathbf{S}_g \rangle$ имеет величину $\delta\vartheta = H_N/H_n = \mu_n I/\mu S$ и порядок величины 0.1° .

Работа частично поддержана грантом НШ-1678.

Литература

1. Алабердин Е.Р., Савченко А.М., Садовников Б.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 6. С. 32 (Moscow University Phys. Bull. 1999. No. 6. P. 41).
2. Ахизер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.В. Спиновые волны. М., 1967.
3. Anderson F.B., Callen H.B. // Phys. Rev. 1964. **136A**. P. 1068.
4. Ожогин В.И., Преображенский В.Л., Савченко М.А. // ЖЭТФ. 1976. **71**, № 2. P. 816.

Поступила в редакцию
27.06.03

ГЕОФИЗИКА

УДК 523.62-1: 629.78

ОСОБЕННОСТИ ВОЗРАСТАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОТОНОВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЭНЕРГИЕЙ БОЛЕЕ 1 МэВ 11–12 апреля 1990 г. ПО ДАННЫМ ИСЗ IMP-8

Г. П. Любимов, В. И. Тулупов
(НИИЯФ)

E-mail: tulupov@tasped.sinp.msu.ru

В работе рассматривается кратковременное (до 12 часов) возрастание интенсивности протонов солнечных космических лучей с $E > 1$ МэВ 11–12 апреля 1990 г. по данным ИСЗ IMP-8. Возрастание состоит из двух пиков. Пики возрастания интерпретируются как локализованные в ловушках ансамбли частиц, при этом первый пик соответствует частицам, находящимся в петлевой гелиосферной ловушке, второй — частицам в ловушке за фронтом ударной волны.

Введение

На ИСЗ IMP-8 11–12 апреля 1990 г. было зарегистрировано кратковременное (длительностью около 12 часов) возрастание интенсивности протонов с энергией более 1 МэВ в виде двух пиков примерно одинаковой длительности. IMP-8 в это время находился вне магнитосферы Земли. Такое же по форме возрастание наблюдалось и на ИСЗ GOES-6,7 и Гранат, которые находились внутри земной магнитосферы. Возрастание имело место на фазе спада продолжительного (до 10 сут) солнечного протонного события, источником которого была, скорее всего, восточная вспышка в 13.15 UT 4 апреля в активной области 6007, сопровождавшаяся радиоизлучением (р/и) IV типа [1]. Эти события со среднечасовым усреднением интенсивности протонов различных энергий показаны на рис. 1 [2]. В данной работе сделан анализ полученной информации с привлечением данных о межпланетном магнитном поле (ММП), солнечном ветре, фотосферном солнечном магнитном поле (СМП) и траекторных данных.

Наблюдательные данные

На рис. 2 представлена обзорная информация за суточный интервал 11–12 апреля о ММП (В),

параметрах плазмы солнечного ветра (скорость v_p , плотность n_p , тепловая скорость v_t), интенсивности протонов различных энергий и альфа-частиц по данным IMP-8 [2], а также среднечасовые данные нейтронного монитора Апатиты. В период с 6 до 12 часов 12 апреля информация IMP-8 отсутствует. Здесь и далее по тексту подразумевается мировое время.

Для анализа информации дополнительно были привлечены среднечасовые значения величин v_p , n_p , температуры T_p плазмы, измеренных на космическом аппарате (КА) Pioneer Venus Orbiter (PVO) [2]. PVO в середине апреля находился приблизительно на 58° западнее линии Солнце–Земля на расстоянии 0.73 а.е. от Солнца на орбите спутника Венеры.

Анализ информации и результаты

Как следует из рис. 2, пики дублетного возрастания протонов наблюдались при различных состояниях межпланетной среды. Если первый пик регистрировался в относительно спокойной среде, при почти постоянных значениях параметров межпланетной плазмы, то для второго пика возрастания, начавшегося в спокойной среде, максимум имел место в сильно возмущенной межпланетной среде.

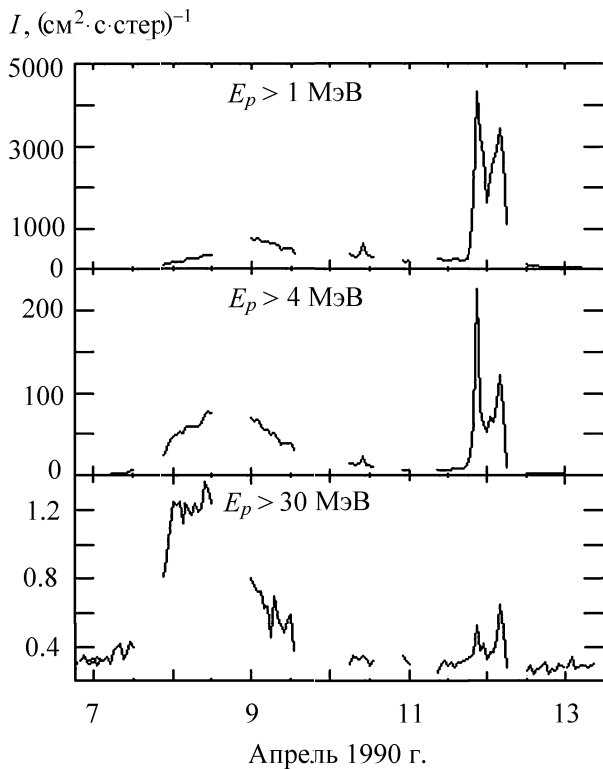


Рис. 1. Интенсивность протонов различных энергий со среднечасовым усреднением по данным ИСЗ IMP-8

В 03.27 UT было зарегистрировано внезапное начало геомагнитной бури SC, вызванное приходом к Земле ударной волны. Параметры межпланетной среды резко изменились. Более чем на порядок увеличилась плотность плазмы n_p (до 120 см^{-3}), которая через два часа резко упала. Величина магнитного поля после роста на фронте ударной волны сильно уменьшилась через 20 мин и вновь скачком выросла до максимальных значений на заднем фронте скачка плотности. Резко увеличилась в это время тепловая скорость плазмы v_t . Следует отметить, что форбуш-спад, по данным нейтронного монитора Апатиты, начался не в момент SC, а два часа спустя, при достижении $|B|$ максимальных значений. В области минимума магнитное поле сильно флуктуирует и по величине, и по направлению. Скорость солнечного ветра v_p после скачка на фронте ударной волны и небольшого изменения на участке максимальных значений n_p продолжала медленно увеличиваться и достигла наибольшей величины $770 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ во второй половине 12 апреля.

Что касается происхождения ударной волны, то анализ экспериментальных данных говорит в пользу волны, образованной на передней границе квазистационарного высокоскоростного потока плазмы (ВСП). Свидетельства в пользу данного заключения состоят в следующем: 1) отсутствие явного кандидата на Солнце в виде солнечной вспышки или внезапно распадающегося волокна как источника ударной волны. Им могла бы быть солнечная вспышка с началом в 11.44 UT 10 апреля в активной области 6007 (N24W04) — самой активной в это

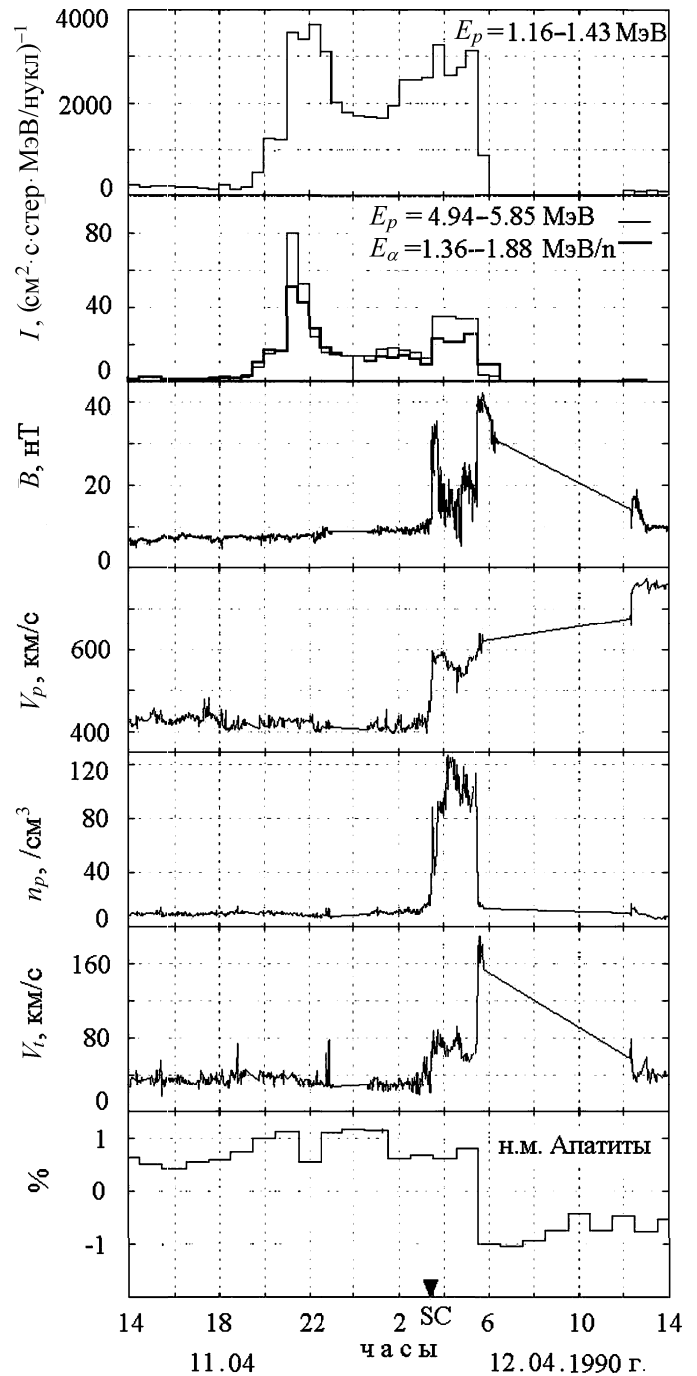


Рис. 2. Интенсивность протонов и альфа-частиц (E_p , E_α) различных энергий, параметры межпланетной среды (B , v_p , n_p , v_t) по измерениям на ИСЗ IMP-8, а также данные нейтронного монитора Апатиты за суточный интервал 11–12 апреля 1990 г. SC — внезапное начало геомагнитной бури

время — с р/и IV типа [1]. Однако небольшой балл вспышки (1N/M1.1) и достаточно высокая средняя скорость ударной волны (более $1000 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) делают эту возможность маловероятной. Кроме того, в этом случае нормаль к фронту ударной волны, скорее всего, была бы близка к направлению от Солнца, тогда как расчет с применением теоремы о компланарности [3] дает отклонение нормали к фронту от этого направления на угол 40° ; 2) на КА PVO, находившемся западнее линии Солнце–Земля,

15 апреля было зарегистрировано прохождение ВСП (рост плотности, температуры, скорости плазмы в определенной последовательности). В окрестностях Земли этот поток должен был пройти раньше. Обратный отсчет по времени определил время прохождения ВСП вблизи Земли — начало 12 апреля, т. е. когда на Земле было зарегистрировано прохождение ударной волны. Следует отметить, что данный ВСП наблюдался на *IMP-8* и *PVO* несколько раз с февраля по июнь с периодом один оборот Солнца относительно Земли и Венеры; 3) как неоднократно отмечалось [4, 5], при прохождении ВСП на его ведущем крае регистрируется отклонение направления вектора скорости солнечного ветра по азимуту φ_{sw} на запад, а в области максимума v_p — на восток. В рассматриваемом случае это имеет место как по данным *IMP-8* (рис. 3), где отклонение от радиального направления вблизи фронта ударной волны достигает $12-14^\circ$, так и по данным *PVO* [2].

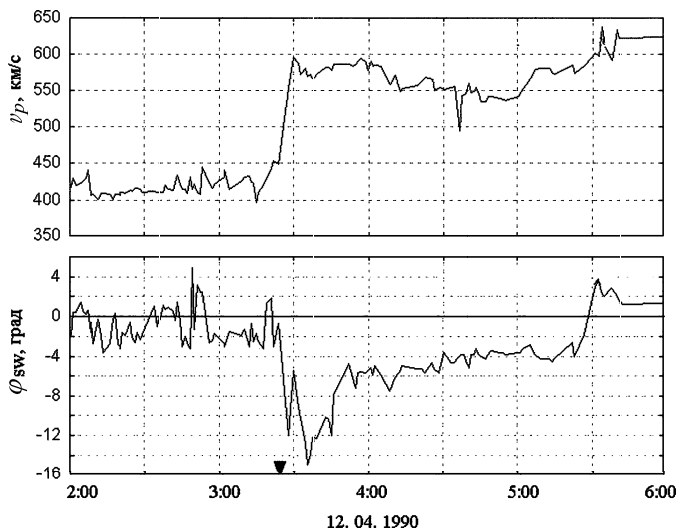


Рис. 3. Зависимость от времени регистрации: модуля скорости солнечного ветра v_p (верхняя панель); угла φ_{sw} отклонения по азимуту направления вектора скорости солнечного ветра от радиального, где положительные значения соответствуют отклонениям на восток, отрицательные — на запад (нижняя панель)

Ударная волна могла образоваться при взаимодействии разноскоростных квазистационарных потоков плазмы солнечного ветра. Область взаимодействия таких потоков неоднородна. В ней можно выделить плотную, сравнительно холодную область сжатого газа и горячую разреженную область, разделенные контактной поверхностью. Такой поверхностью, видимо, является участок резкого спада n_p и роста $|B|$ и v_t (см. рис. 2) в 05.30 UT 12 апреля. За контактной поверхностью могла образоваться обратная ударная волна. Отсутствие данных с 06.00 до 12.00 UT 12 апреля не позволило проверить эту возможность.

В верхней части рис. 4 показаны среднечасовые значения долготного угла ориентации φ_B вектора магнитного поля ММП, а в нижней части рисунка — также среднечасовые значения интенсивности протонов с $E_p > 1$ МэВ рассматриваемого возрастания.

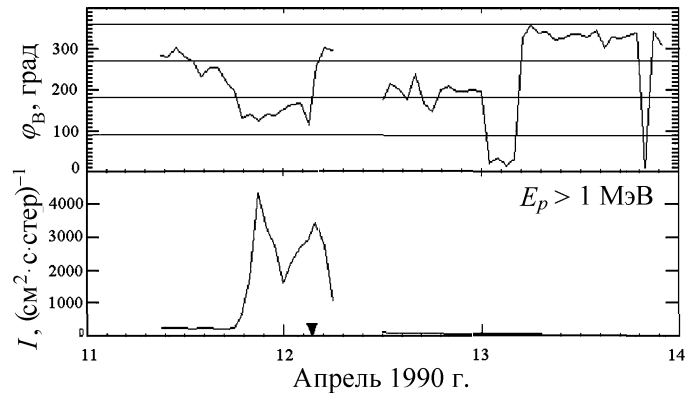


Рис. 4. Временные зависимости среднечасовых значений углов φ_B ориентации вектора межпланетного магнитного поля по долготе (верхняя панель) и интенсивности протонов рассматриваемого возрастания с энергией более 1 МэВ (нижняя панель)

Как видно из рисунка, первый пик и начало второго находятся в области положительных направлений (от Солнца) силовых линий ММП, причем начало возрастания (19.00 UT 11 апреля) совпадает со временем установления устойчивых положительных значений ММП. Конец второго пика возрастания (12.00 UT 12 апреля — по данным *GOES-6,7* и *Граната*) также находится в области положительных значений ММП, сохраняющихся до конца дня, когда магнитное поле резко меняется на отрицательное.

Источником положительного ММП на *IMP-8* является, по-видимому, ограниченная область поверхности Солнца с положительным магнитным полем, расположенная южнее экватора, куда проектируются силовые линии ММП, проходящие через КА (рис. 5). На этом рисунке показан фрагмент карты Солнца с изображением активных областей, волокон и знака фотосферного СМП. Точки с цифрами 1 и 2 на прямой пунктирной линии соответствуют проекциям Земли по силовым линиям ММП (в плоскости xOy GSE) на поверхность Солнца на моменты времени начала и конца возрастания. Это позволяет сделать заключение о солнечном происхождении частиц возрастания (за исключением максимальных значений второго пика, о чем будет сказано ниже). Можно предположить, что одна из солнечных вспышек (например, вспышка в 11.44 UT в активной области 6007) заселила частицами солнечных космических лучей (СКЛ) пучки силовых линий ММП, своеобразные гелиосферные петлевые ловушки [6], одни из оснований которых находятся в ограниченной области поверхности Солнца с положительным магнитным полем, о которой говорилось выше. Заселенные частицами СКЛ петлевые ловушки достигают за счет вращения Солнца космического аппарата, и детекторы регистрируют рост потока частиц с максимумами в 21.00 UT 11-го и в начале 12 апреля.

Энергетические спектры первого и второго пиков возрастания различны. В области энергий 1–5 МэВ спектр первого пика жестче ($\gamma_{dif} = 2.4$) спектра максимальных значений второго пика ($\gamma_{dif} = 2.9$). При

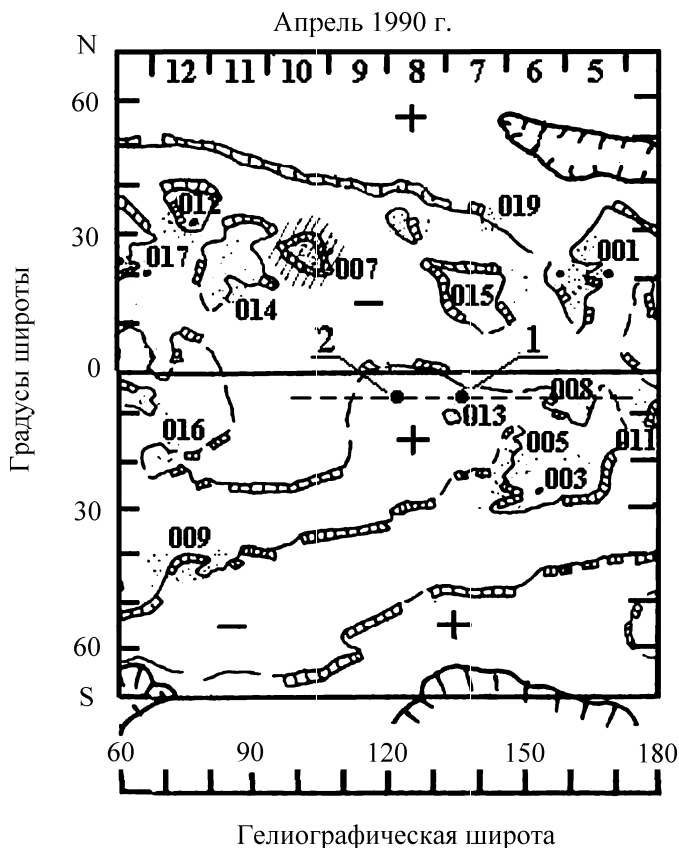


Рис. 5. Фрагмент карты Солнца с изображением активных областей (с указанием их номеров), волокон и знака фото-сферного магнитного поля. Цифрами 1 и 2 на пунктирной линии обозначены положения проекции Земли по силовым линиям ММП (в плоскости xOy GSE) на поверхность Солнца на моменты времени начала и конца возрастания (18.00 UT 11 апреля и 05.30 UT 12 апреля соответственно)

больших энергиях спектры заметно смягчаются, но различие сохраняется, что дает основание говорить о различной природе частиц этих пиков. Максимум второго пика возрастания интенсивности частиц находится в области минимальных и сильно флуктуирующих значений величины магнитного поля за фронтом прямой ударной волны. При этом наибольшие значения интенсивности частиц оказываются на границах этой области (рис. 2). Подобное распределение интенсивности частиц на коротирующих ударных волнах наблюдалось и ранее [7]. Область

минимальных значений B представляет собой ловушку для частиц с их возможным ускорением на ее границах и неоднородностях сильно возмущенного поля внутри.

Заключение

Таким образом, рассматриваемые пики возрастания интенсивности протонов (и альфа-частиц) можно интерпретировать как локализованные в ловушках ансамбли частиц. Ловушки имеют различное происхождение. Ловушка для частиц первого пика — квазистационарные гелиосферные петли ММП. Захваченные в них частицы СКЛ совершают колебания с отражениями от магнитных пробок в вершинах и основаниях петель [6]. Медленный выход частиц из такой ловушки существенно увеличивает время жизни СКЛ по сравнению с коротким временем генерации.

Частицы второго пика возрастания локализованы в ловушке в коротирующей области взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра за фронтом ударной волны в области минимальных значений величины магнитного поля. В ловушке частицы могут ускоряться на флуктуациях магнитного поля внутри области и на ее границах.

Литература

1. Solar Geophys. Data. 1990. No. 554. P. II.
2. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/netdex.html>.
3. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. М., 1976.
4. Siscoe G.L., Goldstein B., Lasarus A.J. // J. Geophys. Res. 1969. **74**, No. 7. P. 1759.
5. Ness N.F., Hundhausen A.J., Bame S.J. // J. Geophys. Res. 1971. **76**, No. 28. P. 6643.
6. Любимов Г.П. // Астрон. циркуляр АН СССР. 1988. № 1531. С. 19.
7. Kunow H., Droge W., Raviart A. et al. // 24th ICRC Papers. Roma, 1995. **4**. P. 455.

Поступила в редакцию
03.07.03