

УСКОРЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

И.М. Подгорный¹, А.И. Подгорный²

¹Институт астрономии РАН, г. Москва

²Физический институт РАН им. П. Н. Лебедева, г. Москва

Аннотация. Анализируются данные аппаратов GOES для энергий протонов 10 – 100 МэВ. Потоки протонов $\sim 10^{32}$, приходящие к Земле непосредственно после вспышек и приходящие через десятки часов, генерируются при распаде токового слоя. Длительность импульса протонов на 2 - 3 порядка превышает длительность вспышек. Протоны высокой энергии от вспышек на Западной части солнечного диска приходят к Земле с пролетным временем. Эти частицы распространяются вдоль магнитных линий спирали Архимеда, связывающих вспышку с Землей. Протоны от вспышки на Восточной части диска, начинают регистрироваться с запаздыванием более трех часов. Такие частицы не могут попасть на линию магнитного поля, связывающую вспышку с Землей. Они перемещаются поперек межпланетного магнитного поля, но не всегда достигают околоземного пространства. Захваченные магнитным полем частицы переносятся солнечным ветром благодаря вмерзности межпланетного магнитного поля в плазму и диффузией поперек поля. Они не всегда могут быть зарегистрированы в околоземном пространстве. Ускорение всех протонов происходит вдоль особой линии токового слоя электрическим полем Лоренца, как это имеет место в пинчевом разряде. Рассмотренные в докладе закономерности не обнаруживаются в малых ($\Phi \leq 1 \text{ c}^2 \text{ стер}^{-1}$) протонных событиях.

Введение

Около 30% больших вспышек (класса X и еще реже класса M) сопровождается потоком релятивистских протонов. Часть протонов попадает на Солнце и вызывает ядерные реакции, а другая часть распространяется в межпланетной среде. Несмотря на многолетние усилия, релятивистские вспышечные протоны продолжают оставаться наименее изученным проявлением вспышки [1]. Энергия заряженной частицы в межпланетной плазме может изменяться только за счет излучения или ее движения вдоль электрического поля $MdV/dt = eE + e[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]/c$. Изменение энергии при движении в поле равно $dW = eE \cdot dr$. Электрическое поле может быть различного происхождения: поле другой заряженной частицы (при столкновении), поле объемного заряда, в частности из-за поляризации зарядов в плазме, поле индукции $d\mathbf{B}/dt$ и т. д. При рассеянии на неоднородностях магнитного поля частица может изменить энергию только за счет движения в электрическом поле, связанном с этой неоднородностью магнитного поля. Это четко сформулировано в известной работе *Бережко Е.Г. и Крымского Г.Ф.* [2]: "Возможность ускорения заряженных частиц в плазме связана с имеющимися в ней электрическими полями." Изменение энергии при рассеянии на магнитной флуктуации определяется величиной и пространственным масштабом электрического поля в этой флуктуации.

В литературе обсуждается две возможности генерации солнечных космических лучей:

а). Ускорение в поле Лоренца $E_{\text{rec}} = -\mathbf{V}_{\text{rec}} \times \mathbf{B}_{\text{cs}}/c$ вдоль особой линии (в частности линии $\mathbf{B}=0$) в токовом слое при быстром магнитном пересоединении [3, 4]. Схема ускорения протонов во вспышечном токовом слое представлена на рис. 1.

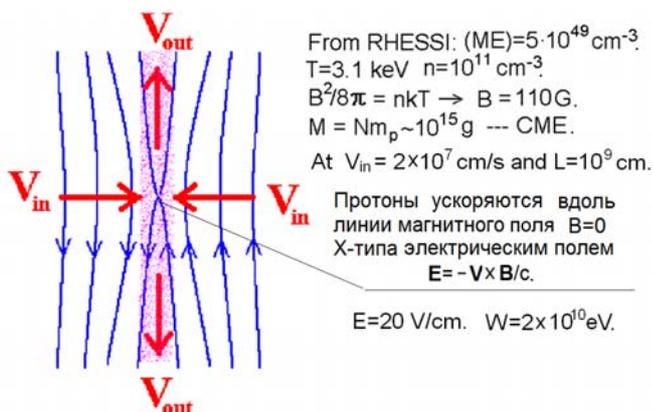


Рисунок 1. Вектора скорости плазмы и линии магнитного поля и в токовом слое при пересоединении линий магнитного поля. Поле Лоренца $-\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ направлено перпендикулярно плоскости рисунка.

б). Ускорение Ферми, т. е. также ускорение электрическим полем Лоренца $\mathbf{E}_{\text{shock}} = -\mathbf{V}_{\text{shock}} \times \mathbf{B}_{\text{shock}}/c$ при отражении от фронта ударной волны или от флуктуации магнитного поля.

Здесь \mathbf{V}_{rec} – скорость пересоединения, \mathbf{B}_{cs} – магнитное поле распадающегося токового слоя, $\mathbf{V}_{\text{shock}}$ и $\mathbf{B}_{\text{shock}}$ – скорость и магнитное поле фронта ударной волны.

Схема ускорения Ферми показана на рис. 2а. Попадая в область магнитного поля облака движущегося навстречу со скоростью V , частица описывает часть ларморовской окружности и набирает в электрическом поле Лоренца $\mathbf{E} = -\mathbf{V}_{\text{sh}} \times \mathbf{B}/c$ энергию $\delta W = 2\rho Ee$, здесь V_{sh} – скорость облака и ρ – ларморовский радиус. В результате, отражения скорость частицы возрастает на $2V_{\text{sh}}$. Если частица находится между двух магнитных облаков, движущихся навстречу друг другу, то такая частица набирает энергию при каждом отражении. В работе [5] делается попытка обнаружить такой механизм ускорения солнечных протонов.

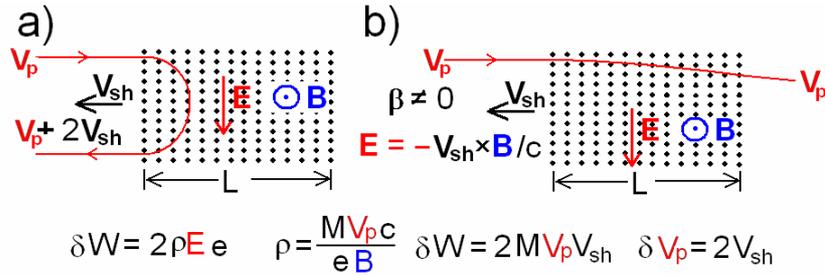


Рисунок 2. а) Схема ускорения Ферми первого типа. б) Для частицы с большой энергией при ларморовском радиусе большем размера магнитного облака дрейф невозможен, и частица пересекает ударную волну

Максимальная энергия протонов при ускорении в токовом слое солнечной вспышки может быть оценена следующим образом. При типичной скорости пересоединения во вспышке $V_{\text{rec}} = 2 \times 10^7$ см/с, поле токового слоя $B_{\text{cs}} = 100$ Г и длине слоя $L = 10^{10}$ см максимальная энергия протонов, ускоренных в токовом слое, может быть оценена, как $W = L V_{\text{rec}} B_{\text{cs}}/c \sim 20$ ГэВ, что соответствует максимальной энергии протонов, измеряемой при вспышке на нейтронных мониторах [6 - 8]. Механизм ускорения в поле Лоренца вдоль особой линии токового слоя аналогичен ускорению частиц вдоль оси газового разряда, сжимающегося собственным магнитным полем (пинч-эффект) [9 - 10].

Максимальная энергия, получаемая при действии механизма Ферми, ограничена. Она соответствует условию равенства ларморовского радиуса к размеру магнитного облака плазмы. При больших энергиях дрейф невозможен, и частица пересекает магнитное облако, не ускорившись в поле Лоренца до большой энергии.

Другая возможность ускорения протонов ударной волной предложена в работе [2]. Ускорение происходит при сохранении адиабатического инварианта протонов, входящих во фронт ударной волны. Попав во фронт волны, протоны могут набирать энергию благодаря градиентному дрейфу вдоль фронта волны. Дрейфуя вдоль фронта ударной волны, протоны проходят разность потенциалов в электрическом поле волны $\mathbf{E}_{\text{shock}} = -\mathbf{V}_{\text{shock}} \times \mathbf{B}_{\text{shock}}/c$, движущейся со скоростью $\mathbf{V}_{\text{shock}}$. Дрейф осуществляется за счет сохранения адиабатического инварианта во фронте ударной волны, как это показано на рис. 3, взятого из работы [2]. В результате рассеяния на магнитных неоднородностях частица многократно возвращается в область ускорения градиентного дрейфа и набирает очередную порцию энергии.

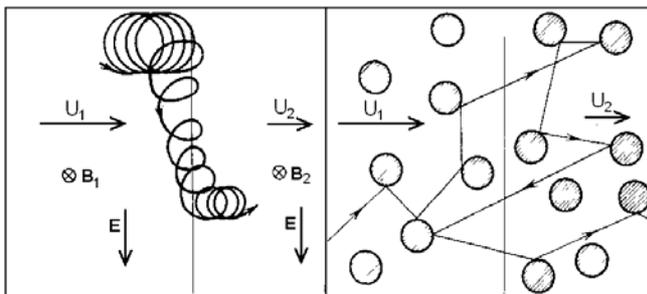


Рисунок 3. Дрейфовая траектория протона во фронте ударной волны и возвращение протона внутрь фронта из-за рассеяния на неоднородностях поля.

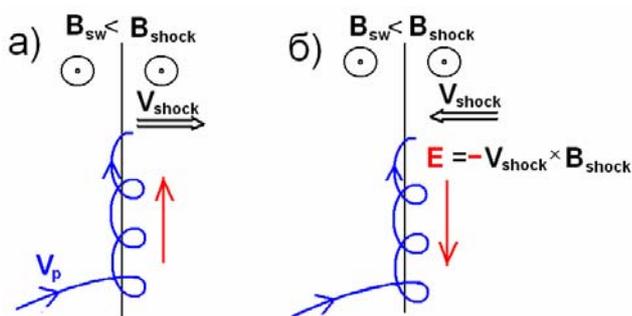


Рисунок 4. Траектория заряженных частиц, проникших во фронт ударной волны.

- а) Частица догоняет фронт ударной волны.
 б) Частица движется навстречу фронту.

Однако для ускорения частицы необходимо, чтобы размер неоднородности магнитного поля был больше ларморовского радиуса частицы в этой неоднородности. Т.е. при $W = 1$ ГэВ и магнитном поле в солнечном ветре 5×10^{-4} Гаусс размер неоднородностей должен быть больше $\sim 10^{10}$ см. Скопление таких неоднородностей в солнечном ветре никогда не наблюдалось.

Для рассмотрения механизма ускорения частицы на фронте ударной волны рассмотрим поведение частицы в системе координат, связанной с плазменной средой, в которой движется частица и распространяется ударная волна. Возможны два случая:

1. Частица догоняет движущийся фронт ударной волны (рис. 4а), захватывается в область градиента магнитного поля и дрейфует вверх, ускоряясь в электрическом поле Лоренца, вызванном движением ударной волны. На градиентный дрейф накладывается дрейф в скрещенных магнитном и электрическом полях. Результирующий дрейф приводит к перемещению частицы вместе с фронтом и ее ускорению. Электрическое поле Лоренца в ударной волне, распространяющейся в ударной волне, при $B = 5 \times 10^{-4}$ Г и скорости $V = 5 \times 10^7$ см/с равно $\sim 2 \times 10^{-4}$ В см/с. Для ускорения до 20 ГэВ частица должна продрефовать на фронте волны расстояние большее 1 а. е.
2. Частица встречает движущийся ей на встречу фронт ударной волны (рис. 4б), попадает в область градиента магнитного поля и дрейфует в этом случае вверх, тормозясь в электрическом поле Лоренца. Результирующий дрейф частицы вместе с фронтом вызывает не ускорение, а торможение. Таким образом, вместо ускорения при отражении от магнитного облака, как это показано на рис. 2, градиентный дрейф захваченной частицы приводит к ее торможению.

Потоки солнечных космических лучей, измеряемые в околоземном пространстве

Спектр потока протонов согласно данным нейтронных мониторов простирается до 20 ГэВ [6, 7]. Средняя длительность импульса протонов составляет 3 суток, в то время как длительность вспышки, определенная по мягкому и жесткому рентгеновским излучениям, обычно составляет 20 - 30 мин. Такая же длительность наблюдается и для импульсов γ -излучения (в основном 2.222 МэВ) от ядерных реакций, происходящих на Солнце при попадании на него ускоренных протонов. Т. е. длительность излучения протонов токовым слоем не может сколько-нибудь значительно отличаться от длительности вспышки. В работах [5, 11, 12] большая длительность регистрируемого на орбите Земли потока протонов объясняется их существованием в солнечном ветре с магнитными ловушками. Рассматривается как удержание частиц в адиабатических магнитных ловушках, так и удержание частиц в межпланетном пространстве на участках линии поля между ударными волнами.

Анализ многолетних измерений на аппаратах GOES в околоземном пространстве [8] показал, что параметры потока релятивистских протонов на орбите Земли сильно зависят от положения вспышки, давшей поток протонов, на диске Солнца. Как следует из измерений на GEOS-ах только часть вспышек класса X ($\sim 30\%$) и некоторые вспышки класса M сопровождаются большими $\Phi \geq 1 \text{ c}^{-2} \text{ c}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ потоками релятивистских протонов на орбите Земли. Приходящие к Земле большие протонные потоки генерируются чаще всего вспышками, возникающими на Западной части солнечного диска. На рис. 5 показана серия протонных событий. Такие серии наблюдаются не чаще двух-трех раз за 11 летний период солнечной активности. Наложение протонных событий не позволяет точно сопоставить каждое протонное событие со вспышкой, поэтому анализ в настоящей работе производился только для одиночных событий. Было проанализировано 30 одиночных протонных событий.

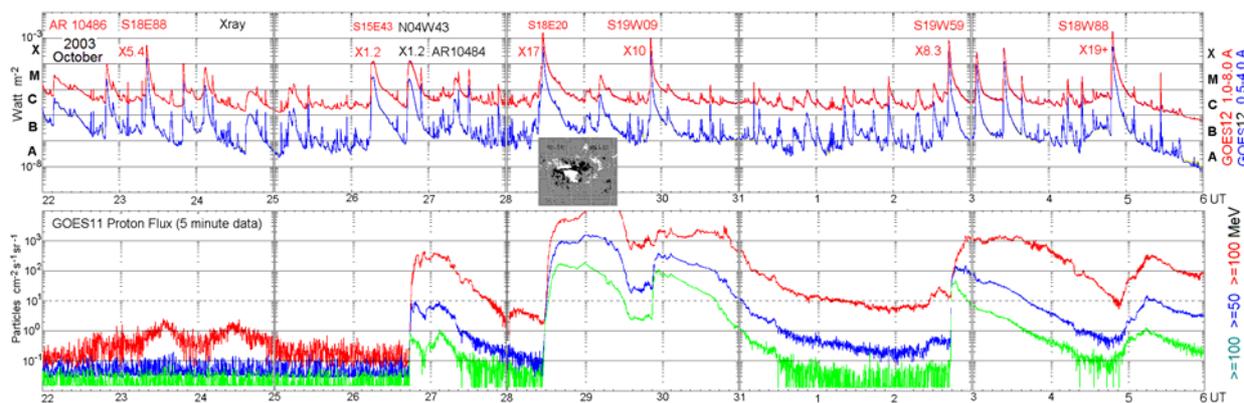


Рисунок 5. Серия протонных событий, вызванных вспышками в различных активных областях. Не все вспышки сопровождаются потоком протонов.

Типичные примеры регистрации больших одиночных потоков протонов показаны на рис. 6. Поток протонов от вспышки, происшедшей на Западе Солнца (рис. 6а), имеет крутой фронт длительностью около 10-20 мин. Поток от такой вспышки приходит к Земле с задержкой относительно начала вспышки около 30 мин. Т. е. задержка определяется временем пролета частицы от Солнца до Земли без столкновений. Протоны от Западных вспышек могут приходить к Земле, двигаясь вдоль линий поля спирали Архимеда. На фронте потока вектор скорости частицы от Западной вспышки, по-видимому, направлен вдоль линии магнитного поля. Полная длительность потока протонов составляет обычно ~3 суток. Она равна времени дрейфа протонов к Земле со скоростью солнечного ветра ($V = 3 \times 10^7$ см/с). В конце протонного импульса, регистрируемого аппаратам GOES, приходят частицы, которые не попали на линию поля, соединяющую вспышку с Землей, и дрейфовали поперек поля. Они распространяются в межпланетной среде со скоростью солнечного ветра. Частицы, приходящие раньше, по-видимому, часть пути проходили вдоль поля, а часть дрейфовали поперек поля. Распространение протонов быстрее солнечного ветра могло иметь место также из-за диффузии поперек поля, за счет рассеяния на магнитных неоднородностях.

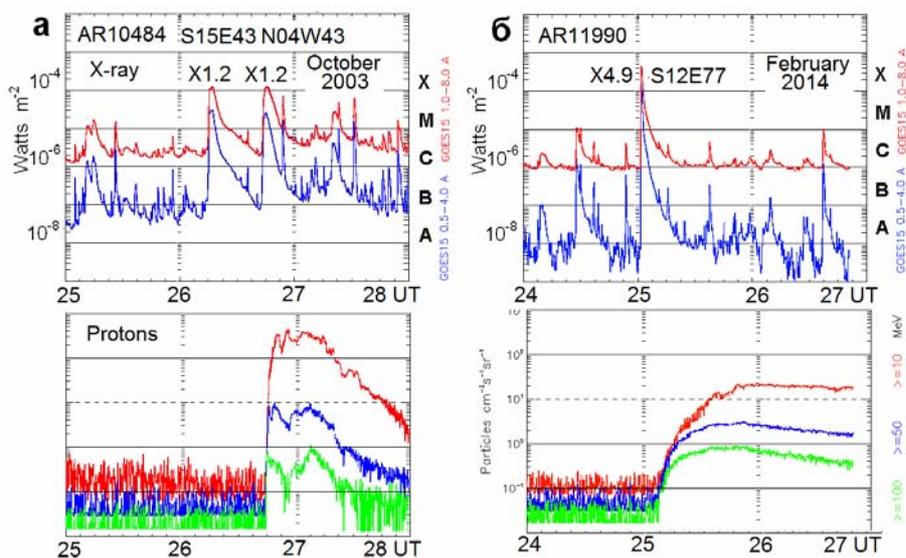


Рисунок 6. Вверху - а) рентгеновое излучение от Западной протонной вспышки, б) рентгеновое излучение от Восточной протонной вспышки. Внизу - типичные большие потоки протонов от этих вспышек по данным аппарата GOES.

В редких случаях форма протонного импульса от Западной вспышки отличается от формы события, приведенного на рис. 6а, – происходит уширение фронта протонов. Иногда ширина фронта может достигать нескольких часов. Это случается, когда протонная вспышка произошла непосредственно после других больших вспышек и корональных выбросов, и имело место искажение спиральной структуры магнитного поля Земли. Уникальная серия, состоящая из 6 больших протонных событий (рис. 5), произошла в течение

10 дней с 27.10.2003 по 6.11.2003. По-видимому, межпланетное поле было сильно искажено, и длительность фронта протонного потока от гигантской Западной вспышки X19 составила 10 часов (рис. 7).

В отличие от Западных вспышек и вспышек, возникших в центральной части диска, протоны от Восточных вспышек начинают регистрироваться с запаздыванием относительно начала вспышки в несколько часов. Фронт потока протонов от Восточных вспышек никогда не бывает крутым, его длительность достигает суток (рис. 6б). Протоны от Восточных вспышек не могут прийти к Земле вдоль линии спирали Архимеда. Они могут переноситься солнечным ветром и распространяться вследствие диффузии поперек магнитного поля из-за рассеяния на флуктуациях. Диффузия должна приводить к уширению фронта потока протонов. Только очень мощные протонные потоки вблизи центра диска могут деформировать магнитное поле и приходиться к орбите Земли с малой задержкой и крутым фронтом, распространяясь со скоростью частиц независимо от линий магнитного поля спирали Архимеда. Такой сценарий, по-видимому, имел место 28.10.2003 во время очень мощной вспышки X17 S18E20 (рис. 5).

Сложные траектории частиц в межпланетной среде, приходящих к Земле от Восточных вспышек, затрудняют перенос регистрируемых протонов, поэтому потоки быстрых протонов от восточных вспышек должны быть меньшими, чем потоки вдоль линий магнитного поля от Западных вспышек. Многолетние измерения приборами GOES показывают, что число зарегистрированных больших протонных событий от Западных вспышек на порядок величины превышает число протонных событий от Восточных вспышек. Это значит, что, дрейфуя поперек магнитного поля, протоны от Восточных вспышек не всегда могут достичь околоземного пространства.

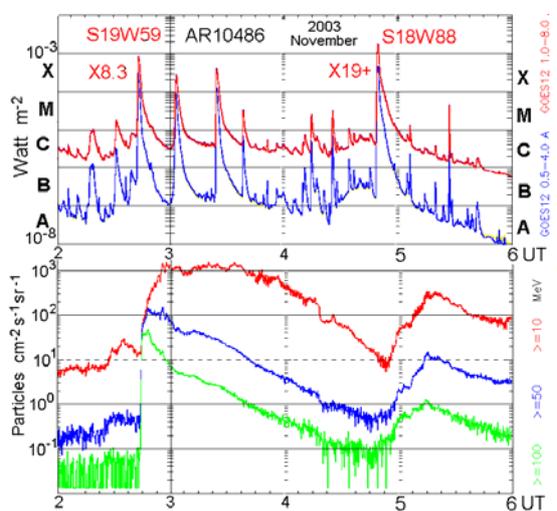


Рисунок 7. Вверху - рентгеновское излучение от двух Западных протонных вспышек, зарегистрированных после серии больших вспышек. Внизу - второе протонное событие имеет необычно длительный (~10 часов) для Западных вспышек фронт

Малые потоки солнечных космических лучей

Два типичных слабых протонных события и рентгеновские вспышечные импульсы показаны на рис. 8.

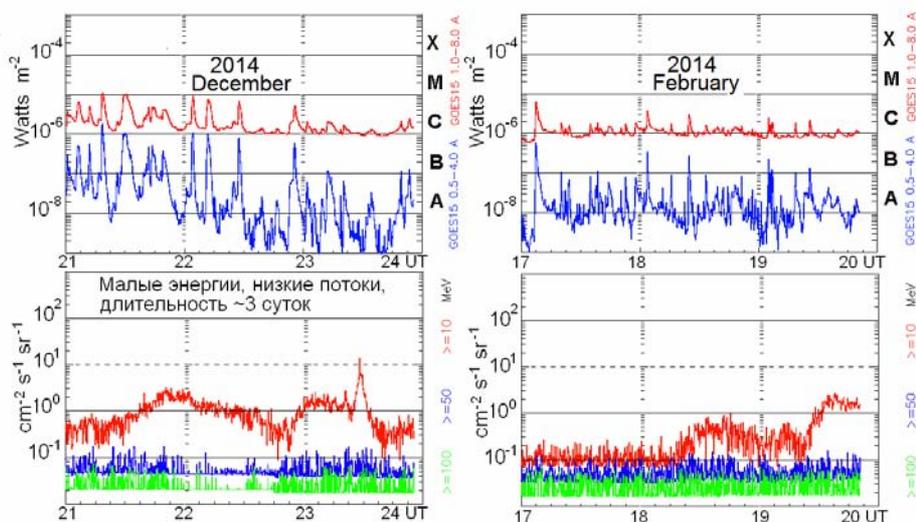


Рисунок 8. Вверху - рентгеновское излучение вспышек. Внизу - типичные малые потоки протонов по данным аппарата GOES

Малые потоки ускоренных протонов регистрируются примерно с такой же частотой, что и большие. В отличие от больших протонных событий ($\Phi \geq 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$) малые потоки солнечных космических лучей ($\Phi \leq 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$) не обнаруживают четкой связи с конкретными вспышками. Импульсы малых потоков появились на фоне ряда мелких вспышек, в основном класса С, однако корреляция малых протонных событий с конкретными вспышками не обнаруживается. Длительность малых протонных событий, как и больших, измеряется сутками, но их структура импульсов сугубо индивидуальна, никаких характерных особенностей малые потоки не обнаруживают. Отсутствие корреляции малого протонного события с конкретной вспышкой, наблюдаемой на диске Солнца, по-видимому, указывает на генерацию такого события на обратной стороне Солнца и распространение протонов вдоль удачно расположенных спиральных линий магнитного поля.

Выводы

1. Анализ результатов измерений на нейтронных мониторах и на аппаратах GOES позволяет утверждать, что большие протонные события генерируются в токовом слое во время вспышки. Четкая корреляция малых протонных событий с конкретными вспышками не обнаружена. По-видимому, малые события генерируются вспышками на обратной стороне Солнца.
2. Для ускорения протонов в ударных волнах необходимо, чтобы ларморовский радиус частицы превосходил толщину фронта ударной волны. Это условие практически невыполнимо в межпланетной плазме для частиц с энергией ~ 10 ГэВ.
3. Потоки протонов солнечных космических лучей обнаруживают четыре характерных масштаба времени:
 - а). Типичная длительность генерации ускоренных протонов равна длительности вспышки $t_{\text{SF}} \sim 20\text{-}30$ мин.
 - б). Типичная длительность потока ускоренных протонов на орбите Земли равна времени распространения солнечного ветра от солнечной короны $t_{\text{SW}} = 1 \text{ а.у.} / V_{\text{SW}} \sim 3$ суток. Это значит, что наиболее запаздывающие протоны оказываются захваченными магнитным полем солнечного ветра и дрейфуют к Земле поперек магнитного поля со скоростью солнечного ветра.
 - в). Запаздывание прихода крутого фронта потока релятивистских протонов, генерируемого Западной вспышкой, к орбите Земли $t_{\text{r}} = 15 - 20$ мин определяется пролетным временем протонов вдоль линий спирали Архимеда $\sim 1.5 \text{ а.у./с}$. Бесстолкновительный поток протонов вдоль спиральной линии магнитного поля несет информацию о спектре вспышечных протонов, который по данным нейтронных мониторов имеет экспоненциальный вид.
 - д). Фронт потока протонов от Восточных вспышек никогда не бывает крутым. Приход пологого (одни сутки) фронта потока релятивистских протонов от Восточной вспышки к орбите Земли через $t_{\text{D}} \sim 3 - 5$ часов может быть связан с диффузией поперек поля при рассеянии протонов на магнитных неоднородностях. Диффузионный поток опережает поток солнечного ветра.
 - е). Протонные события от Восточных вспышек регистрируются на порядок величины реже, чем от Западных вспышек. Это связано с отсутствием линий магнитного поля, соединяющих Восточную вспышку с околоземным пространством. Не всегда поток протонов, двигаясь поперек поля, может достичь околоземного пространства и быть зарегистрированным приборами GOES.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №13-02-00064.

Литература

1. Miroshnichenko L.I. Solar Cosmic Rays. Kluwer. Acad Publ., 2001.
2. Бережко Е.Г., Крымский Г.Ф. УФН. **154**, 49 (1988).
3. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Геомагн. Аэрон. **52**, 163 (2012).
4. Подгорный А.И., И.М. Подгорный, Геомагн. Аэрон. **52**, № 2. 176 (2012).
5. Тулупов и др. Космич. Исслед. **50**, № 6. 427 (2012)
6. Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Подгорный А.И., Подгорный И.М. АЖ. **82**, 940 (2005).
7. Подгорный И.М., Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Подгорный А.И. АЖ. **87**, 704 (2010).
8. Подгорный А.И., Подгорный И.М. АЖ. **92**, 767 (2015).
9. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. М. Гос-изд ф.-м. лит. 1961.
10. Ковальский Н. Г., Подгорный И.М., Степаненко М.М. ЖЕТФ. **11**, 1040 (1960)
11. Tan L.C. et al. Astrophys J. **750**, 146 (2012).
12. Malandraki O. Sun and Geosphere. **10**, 21 (2015).