

**МОЩНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА СОЛНЦЕ:
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА И ЭФФЕКТИВНОЕ УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ**

М.А. Лившиц

**LARGE NON-STATIONARY PROCESSES ON THE SUN: SPACE-TEMPORAL STRUCTURE
AND EFFECTIVE ACCELERATION OF PARTICLES**

M.A. Livshits

Обобщаются сведения о высокоэнергичных процессах на Солнце. Уточняется классификация вспышек и обосновывается точка зрения о том, что корональный выброс массы и собственно вспышка являются проявлениями одного и того же общего процесса, по крайней мере в случае самых мощных событий. Затем проанализированы данные об ускорении электронов (RHESSI, «Марс-Одиссей») и протонов. Показано, что существование двух пиков жесткого рентгеновского излучения, разделенных на 10–20 мин, и эволюция спектров этого излучения свидетельствуют о двух эпизодах ускорения. Проанализированы спектры 172 протонных возрастаний, отождествляемых с отношением потоков протонов с энергиями более 10 и 100 МэВ около Земли. Оказалось, эти спектры остаются практически теми же самыми у большинства мощных вспышек при благоприятных условиях выхода из короны и распространения частиц в межпланетном пространстве. Это является аргументом в пользу инвариантности основных черт эффективного ускорения частиц в мощных событиях. Этот процесс происходит на взрывной фазе вспышки, и его источник располагается низко, непосредственно над хромосферой, в области, примыкающей к пятнам. Имеются основания полагать, что при этом происходит быстрое одновременное ускорение электронов и протонов с захватом некоторой доли частиц в магнитные ловушки. Существует, однако, небольшое количество событий, в которых уже на постэруптивной фазе развития вспышки из короны выходит дополнительное количество протонов с энергией до 10–30 МэВ. Анализ этих случаев с более мягким спектром частиц скорее свидетельствует о дополнительном ускорении частиц на корональных высотах (около 30 000 км), чем об облегчении выхода частиц из ловушек. В статье оценен вклад потока протонов с энергией более 10 МэВ, возникающего на постэруптивной фазе вспышки, в общий поток частиц в максимуме протонного возрастания и кратко обсуждаются возможные механизмы ускорения частиц на значительных высотах в короне.

Data on high energetic processes are summarized. First of all, classification of flares is specified. Point of view that a CME and a flare properly are manifestation of a unified process at least for the most powerful events is founded. Then, data on acceleration of electrons (RHESSI, Mars Odyssey) and protons are analyzed. It is shown that the existence of two spikes in the hard X-rays with time delay of 10–20 min and the evolution of the spectra (i.e. their hardness) are the evidence that there are two episodes of acceleration. We carried out also an analysis of 172 proton enhancement spectra identified with the proton flux ratio with the energies greater than or equal to 10 and 100 MeV near the Earth. These spectra turn out to be practically the same as those for the most of large flares at favourable conditions for the escape from the corona and propagation particles through the interplanetary space. During some small number of events with the softer spectra, besides this basic acceleration at the explosive phase of the flare, an additional acceleration of the protons up to 10–30 MeV occurs.

Presented here results allow us to suppose that during large non-stationary processes two sources of particle acceleration do exist: the first one is in the impulsive (explosive) phase, and the second one appears when post eruptive loops start to develop. The first of these sources is situated low, just above the chromosphere, while the second one is settled at coronal loop heights (around 30 000 km). These results for the basic acceleration demonstrate on comparatively fast simultaneous acceleration of electrons and protons with capture of some number of particles into magnetic trap.

Кратко обсудим самые общие свойства мощных нестационарных процессов на Солнце. Изучение структуры мощных вспышек и ее изменения при переходе от импульсной стадии к последующему развитию показывает, что наиболее мощные высокоэнергичные явления развиваются в одном или нескольких эпизодах. Будем рассматривать только один эпизод, включающий в себя корональный выброс массы (КВМ) и собственно вспышку. Обычно жесткий рентгеновский всплеск состоит из нескольких импульсов, и только один или два из них характеризуются наиболее жестким спектром. Часто эти моменты называют взрывной фазой вспышки, и именно в это время развиваются высокоэнергичные явления. Они проявляются в наблюдениях прежде всего как гамма-всплеск.

В 2005 г. автором была высказана идея о том, что в обсуждаемых событиях основным является мощное взрывное энерговыделение. При этом в небольшой области плазма нагревается до очень высоких температур и частицы ускоряются вплоть до релятивистских энергий. КВМ выносит довольно большую массу газа сначала в корону, а затем и в межпланетное пространство. Часть замкнутых магнитных силовых линий раскрывается, и последующая релаксация конфигурации – возврат ее в прежнее состояние – приводит к форми-

рованию коронального токового слоя. Процесс пересоединения в нем поддерживает вспышку.

Часть газа, выбрасываемого КВМ, задерживается в короне, и горячая плазма начинает падать на петли нижележащего магнитного поля. Это падение усиливается за счет направленного вниз потока горячей плазмы и ускоренных частиц из коронального токового слоя, который для простоты рассуждений считается вертикальным. Впервые на роль нисходящих потоков газа обратили внимание авторы [1]. Как и в [1], в этой работе принято, что падение плазмы и влияние токового слоя отвечают за формирование и длительное существование постэруптивной арочной системы. Само образование горячего облака плазмы наблюдалось 25 января 2007 г. на радиотелескопе РАТАН-600 [2], а физические условия в постэруптивных арках детально изучены в [3].

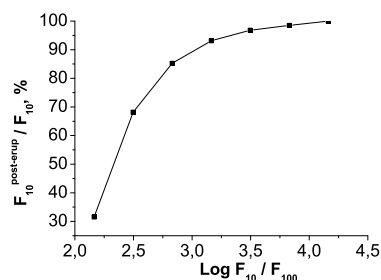
Высказанная в 2005 г. идея предполагала, что основное ускорение частиц происходит во время взрывной фазы. Появившиеся наблюдательные данные позволили сначала для вспышки в День Бастилии [4] и затем для события 20 января 2005 г. [5] показать, что эффективное ускорение тяжелых частиц происходит во взрывной фазе вспышки в источнике, располагающемся на небольшой высоте вбли-

зи пятна. Этот вывод подтверждается в настоящее время результатами анализа протонных возрастанний. По созданной базе данных А.В. Беловым и В.Г. Курт было показано, что потоки ускоренных протонов на околоземной орбите существенно зависят от общей энергетики вспышки – ее рентгеновского балла. Осокин и др. [6] проанализировали спектры протонных возрастанний, отождествляемые с логарифмом отношения потоков частиц в диапазонах более 100 и 10 МэВ – величиной $\delta = \lg(F_{10}/F_{100})$, для 200 мощных событий с благоприятными условиями выхода из короны и распространения частиц в межпланетном пространстве. Распределение числа вспышек по величине δ оказалось гауссовским со сравнительно небольшим разбросом. Его максимум соответствовал превышению максимального потока в диапазоне энергий 10 МэВ над потоком на 100 МэВ в 40 раз. Это свидетельствовало о существовании наиболее часто встречающегося спектра ускоренных протонов.

Далее автором были детально рассмотрены явления с более мягким спектром. Был проведен статистический анализ возрастанний протонов на околоземной орбите с максимальным потоком протонов $F > 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ rfu}$ при $E_p > 10 \text{ МэВ}$ и $F > 0.03 \text{ rfu}$ при $E_p > 100 \text{ МэВ}$. В анализ включались возрастанния, связанные с С3-Х-вспышками, располагающимися в долгом интервале 20 E – 90 W. Спектр ускоренных протонов характеризовался величиной $\log F_{10}/F_{100}$. Предполагалось далее, что релятивистские частицы с $E_p > 100 \text{ МэВ}$ ускоряются в основном источнике. Избыток низкоэнергичных частиц с $E_p > 10 \text{ МэВ}$, т. е. различие наблюдаемого потока и предполагаемого числа частиц, которые могут ускориться в основном источнике, относился к дополнительному вкладу, появляющемуся во время постэруптивной фазы. Эта относительная доля частиц приведена на рисунке, из которого следует, что она резко возрастает для очень долго длящихся вспышек с самым мягким спектром частиц.

Анализ данных об ускорении электронов (RHESSI, «Марс-Одиссей» [7, 8] показывает, что существование двух пиков жесткого рентгеновского излучения, разделенных на 10–20 мин, и эволюция спектров этого излучения свидетельствуют о двух эпизодах ускорения, скорее всего, в том же основном источнике и при последующем образовании токового слоя. Иначе говоря, некоторое ускорение частиц присутствует на постэруптивной фазе. На это же указывают результаты наблюдений на РАТАН-600 источника над лимбом 25 января 2007 г. Токовый слой, безусловно, влияет на распространение ускоренных частиц и может доускорять частицы и формировать пучки протонов, как это происходит в хвосте магнитосферы Земли. Однако, вероятнее всего, это влияние не распространяется в область энергий протонов свыше 10–30 МэВ. Кроме того, ускорение в корональном токовом слое необходимого в мощных явлениях очень большого количества частиц сильно затруднено. Поэтому более вероятно, что в мощных мягких событиях дополнительное ускорение мягких протонов происходит на ударной волне.

Выше оценен вклад потока протонов с энергией больше 10 МэВ, возникающего на постэруптивной



Вклад потока протонов с энергией больше 10 МэВ, возникающего на постэруптивной фазе вспышки, в полный поток частиц в том же диапазоне энергий в максимуме протонного возрастания для событий с мягким спектром. По оси абсцисс – используемая нами характеристика спектра частиц, по оси ординат – разность F_{10} между полным потоком F_{10} и потоком, возникающим в основном источнике на взрывной фазе вспышки; эта разность отнесена к полному потоку. Для исключения вклада основного источника отношение $\log F_{10}/F_{100}$ принималось равным 2, что выходит за пределы гауссовского распределения для мощных протонных возрастанний.

фазе. Интересно выяснить, в каких случаях этот вклад определяется токовым слоем, а когда ударной волной. Наши предварительные результаты указывают на то, что ускорение в корональном токовом слое проявляется в достаточно слабых событиях, когда импульсная фаза выражена плохо и быстро завершилась. Во время мощных событий очень большие потоки протонов с энергиями 10–50 МэВ вероятнее всего возникают на фронте ударной волны.

Благодарю Л.К. Кашапову и А.Р. Осокина за данные, предоставленные до их опубликования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 05-02-17105 и 08-02-00872.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheeley N.R. Jr., Warren H.R., Wang Y.M. The Origin of postflare loops // *Astrophys. J.* 2004. V. 616. P. 1224–1231.
2. Grigorieva I.Y., Borovik V.N., Livshits M.A., et al. Post-eruptive arcade formation in 25 January, 2007 CME/flare limb event: microwave observations with the RATAN-600 radio telescope // *Solar Phys.* 2008. (in print).
3. Grechnev V.V., Uralov A. M., Zandanov V.G., et al. Plasma parameters in a post-eruptive arcade observed with CORONAS-F/SPIRIT, Yohkoh/SXT, SOHO/EIT, and in microwaves // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2006. V. 58. P. 55–68.
4. Лившиц М.А., Белов А.В. Когда и где наиболее эффективно ускоряются солнечные космические лучи? // *Астрон. журн.* 2004. Т. 81. С. 732–745.
5. Grechnev V.V., Kurt V.G., Chertok I.M., et al. // *Solar Phys.* 2008. (in print).
6. Осокин А.Р., Лившиц М.А., Белов А.В. Источники эффективного ускорения частиц в солнечных вспышках: наблюдательный аспект // *Астрон. журн.* 2007. Т. 84. С. 642–654.
7. Grigis P.C., Benz A.O. Hardening in large solar flares // *Astro-ph / 0708.2472v1*, Aug 18, 2007.
8. Кашапова Л.К., Лившиц М.А. Эруптивные процессы в начале развития мощных вспышечно-активных областей на Солнце // *Материалы конференции ГАО-2007. Астроном. журн.* 2008 (в печати).

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк