

УДК 523.9:524.1

МНОГОКРАТНОЕ УСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ НА СОЛНЦЕ И ИХ СВОБОДНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДО ЗЕМЛИ 20 ЯНВАРЯ 2005 г.

© 2006 г. А. Б. Струминский*

Институт космических исследований РАН, Москва

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Троицк

Поступила в редакцию 10.01.2006 г.

Проанализированы наблюдения солнечных протонов с энергией >80 МэВ вблизи Земли и солнечной вспышки 20 января 2005 г. в различных диапазонах электромагнитного излучения. Примерно первые 30 мин после выхода в межпланетное пространство солнечные протоны с энергией более 80 МэВ распространялись без рассеяния до Земли и временные профили их интенсивности определялись только временным профилем источника на Солнце и его энергетическим спектром. Функция инжекции протонов 80–165 МэВ была отлична от нуля, начиная с 06:43:80 UT, и может быть представлена в виде произведения временной части — темпа счета ACS (Anti Coincidence System) SPI и (Spectrometer on INTEGRAL) и энергетической части — степенного спектра протонов $\sim E^{-4.7 \pm 0.1}$. Протоны с энергией более 165 МэВ были инжектированы на 4 мин, а релятивистские электроны — на 9 мин позже этого времени. Тесная взаимозависимость высокоэнергичного электромагнитного излучения Солнца и потоков солнечных протонов вблизи Земли является аргументом в пользу длительного и многократного ускорения протонов в солнечных вспышках. По всей видимости, создание системы постэруптивных петель сопровождалось последовательными энерговыделениями и ускорением заряженных частиц различной энергии. Полученные результаты противоречат представлениям об ускорении космических лучей в постепенных солнечных событиях на ударной волне коронального выброса массы.

Ключевые слова: солнечные вспышки, корональные выбросы массы, электромагнитное излучение Солнца, инжекция солнечных высокоэнергичных частиц.

MULTIPLE PROTON ACCELERATION ON THE SUN AND FREE PROTON PROPAGATION TO THE EARTH ON JANUARY 20, 2005, *by A. B. Struminsky*. We analyze the observations of solar protons with energies >80 MeV near the Earth and the solar flare of January 20, 2005, in various ranges of the electromagnetic spectrum. Within the first ~ 30 min after their escape into interplanetary space, the solar protons with energies above 80 MeV propagated without scattering to the Earth and their time profiles were determined only by the time profile of the source on the Sun and its energy spectrum. The 80–165 MeV proton injection function was nonzero beginning from 06:43:80 UT and can be represented as the product of the temporal part, the ACS (Anticoincidence System)/SPI (Spectrometer on INTEGRAL) count rate, and the energy part, the power-law proton spectrum $\sim E^{-4.7 \pm 0.1}$. Protons with energies above 165 MeV and relativistic electrons were injected, respectively, 4 and 9 min later than this time. The close correlation between high-energy solar electromagnetic radiation and solar proton streams near the Earth is an argument for a prolonged and multiple proton acceleration in solar flares. The formation of a post-eruptive loop system was most likely accompanied by successive energy releases and acceleration of charged particles with various energies. Our results are in conflict with the ideas of cosmic-ray acceleration in gradual solar proton events at the shock wave of a coronal mass ejection.

PACS numbers : 96.60.ph, 96.60.qe, 96.60.Tf; 96.60.Vg

Key words: solar flares, coronal mass ejections, solar electromagnetic radiation, solar high-energy particle injection.

* Электронный адрес: astrum@iki.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Длительное гамма-излучение Солнца, зарегистрированное в июне 1991 г. с помощью астрофизических спутников “Гамма-1” и CGRO, — поразительный и неожиданный экспериментальный результат наблюдений в 22 цикле солнечной активности. Для генерации такого излучения необходимы специфические условия в области ускорения и/или удержания протонов после импульсной фазы вспышки (Рамати, Манджавидзе, 1999). Этот результат еще не получил однозначного теоретического объяснения, а также не подтвержден непосредственными наблюдениями в других солнечных событиях (см. обзор Райана, 2000, и ссылки там). Эти наблюдения инициировали ряд работ, которые связывали характеристики солнечных протонов и нейтронов вблизи Земли с длительным гамма-излучением Солнца.

Так, схожесть временных профилей гамма и микроволнового излучения послужило основой для модельной функции инжекции нейтронов в событиях 4 июня 1991 г. (Струминский и др., 1994) и 15 июня 1991 г. (Ковальцов и др., 1995), когда в обоих случаях было необходимо предположить длительную генерацию нейтронов как в импульсной, так и постэруптивной фазах солнечной вспышки. Согласно оценкам в работах (Кочаров и др., 1994; Акимов и др., 1996) 15 июня 1991 г. протоны с энергией <150 МэВ были инжектированы в межпланетное пространство раньше, чем релятивистские протоны, ответственные за наземное возрастание интенсивности космических лучей (ground level enhancement, GLE), наблюдаемое сетью нейтронных мониторов (НМ). В этих работах были приведены аргументы в пользу того, что релятивистские протоны ускорялись длительное время в постэруптивной фазе, а не были захвачены в ловушке.

На основании диффузионной модели распространения протонов и их длительной инжекции в межпланетное пространство была сделана оценка числа протонов с энергией 100 МэВ в источнике на Солнце в различные моменты времени в мощных солнечных протонных событиях 22-го (Струминский, 2003а) и 23-го (Струминский, 2003б) циклов солнечной активности. Для события 11 июня 1991 г. получено качественное, а для 15 июня 1991 г. количественное согласие с числом протонов необходимых для генерации наблюдаемого гамма-излучения (оценка Кочарова и др., 1998). Это свидетельствует о том, что генерация длительного гамма-излучения была вполне возможна и в других событиях, когда сходные количества протонов могли находиться вблизи Солнца в течение нескольких часов. Однако такие наблюдения в это время просто не проводились или проводились, но

точность измерений была заведомо недостаточна. Эти выводы нуждаются в подтверждении или опровержении в других событиях 23 цикла солнечной активности.

Процессы многократного и длительного ускорения заряженных в постэруптивной фазе солнечных вспышек являются альтернативой “современной парадигме” происхождения солнечных энергичных частиц, согласно которой в постепенных событиях (длительность мягкого рентгеновского излучения более 30 мин) ударная волна коронального выброса массы (coronal mass ejection, CME) ускоряет частицы высоко в короне и поставляет их в межпланетное пространство (Римс, 1999), а процессы в нижней и средней короне, генерирующие гамма-излучение на Солнце, не дают существенного вклада в потоки межпланетных частиц.

По всей видимости, в результате солнечных событий, произошедших до 20 января 2005 г., в гелиосфере сложились условия для распространения протонов с энергией >80 МэВ практически без рассеяния, что позволило впервые наблюдать эффекты источника непосредственно на Земле в течение первых 20–30 мин после начала возрастания. Задача предлагаемой работы состоит в том, чтобы показать это количественно, вычислить временной профиль интенсивности протонов с энергией 80–165 и 165–500 МэВ вблизи Земли по данным наблюдений солнечного гамма-излучения. Обычно длины свободного пробега таких протонов в межпланетном пространстве находятся в пределах 0.06–0.3 а.е. (Бибер и др., 1994), что маскирует влияние источника на потоки солнечных космических лучей, наблюдаемые вблизи Земли.

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Солнечное событие 20 января 2005 г. произошло в активной области AR 10720. В табл. 1 представлены некоторые характеристики этого события, которые сравниваются с характеристиками солнечных вспышек 28 октября 2003 г. и 7 сентября 2005 г., также обсуждаемых в работе. Ниже, говоря о процессах на Солнце, мы обсуждаем наблюдения электромагнитного (ЭМ) излучения на Земле, поэтому все времена приводятся относительно времени UT прихода ЭМ излучения на Землю (для перехода к солнечному времени необходимо отнять примерно 8 мин).

Жесткое рентгеновское и гамма-излучение от этой вспышки было зарегистрировано на борту КА RHESSI, КОРОНАС-Ф и ИНТЕГРАЛ. На рис. 1 показан черно-белый вариант четырех кадров визуализации (<http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a003100/a003162/>) для моментов времени, которые отмечены стрелками на рис. 2а. Данная

Некоторые характеристики солнечных вспышек, обсуждаемых в работе

Дата	Координаты	Балл	Рентген	Начало, UT	Максимум, UT	Конец, UT
28.10.2003	S16E08	4B	X17.2	09:51	11:10	11:24
20.01.2005	N12W58	2B	X7.1	06:36	06:43	08:54
07.09.2005	S06E89	3B	>X17	17:17	17:40	18:03

визуализация построена на основе изображения в гамма и рентгеновском диапазонах (КА RHESSI), которое наложено на изображение вспышки в ультрафиолетовом диапазоне (КА TRACE). Четко видна белая двухленточная структура вспышки с темными пятнами (в оригинале синими) гамма-излучения в основании арок и серая область рентгеновского излучения самой высокой арки (в оригинале красная). Отметим, что просмотр этого фильма по кадрам показывает, что в 06:50:10; 07:00:00; 07:05:20 UT излучение в основаниях петель исчезает.

Первое СМЕ наблюдалось, начиная с 06:54 UT (возможно, было второе СМЕ в 07:12 UT), что соответствует его отрыву от поверхности Солнца в 06:40 UT (Симнетт, 2006). Радиоизлучение II типа, которое обычно связывают с излучением электронов вблизи ударной волны, началось в 06:44 UT. Таким образом, времена, начиная с 06:44 UT, соответствуют постэруптивной фазе вспышки.

В наиболее благоприятном положении для наблюдения радиоизлучения солнечной вспышки 20 января 2005 г. была австралийская обсерватория Лирмонф (Learmonth). На рис. 2а показаны временные профили радиоизлучения в диапазоне 8.8 ГГц и темп счета ACS (Anti Coincidence System) SPI (Spectrometer on INTEGRAL). Микроволновое излучение представляет собой продолжительный и мощнейший всплеск, который является свидетельством длительного (в том числе постэруптивного) выделения энергии (частное сообщение, Черток И.М., 2005). Второй максимум излучения 8.8 ГГц наблюдался примерно в 07:12 UT.

Согласно первым спектроскопическим результатам КА RHESSI показатель степенного спектра протонов в области малых энергий, полученный из данных гамма-наблюдений, равен 2.3 ± 0.3 и практически совпадает с показателем спектра, измеренного вблизи 1 а.е. (2.1 ± 0.1). Это предполагает, что протоны, распространявшиеся в межпланетном пространстве, были ускорены во вспышке, а не обязательно ударными волнами (Крюкер и др., 2005). Вычисления Марфи и др. (2005) указывают на химический состав солнечных ионов, характерный для ускорения во вспышках с отношением $\alpha/p > 0.1$, а

не ударными волнами. Временные профили в рентгеновском и гамма-диапазоне, наблюдавшиеся RHESSI, представлены в Интернете (см. <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessidatacenter/>).

Высокоэнергичная часть гамма-спектра в событии 20 января 2005 г. была измерена прибором SONG на КА КОРОНАС-Ф (Кузнецов и др., 2005). Отмечено отсутствие гамма-квантов от распада ионов вплоть до 06:45:30 UT. С другой стороны, спектр гамма-квантов, зарегистрированный в промежутке времени от 06:46:58 и до 06:50:28 UT, свидетельствует о взаимодействии в атмосфере Солнца протонов с энергией более 300 МэВ.

Наземное возрастание интенсивности космических лучей, зарегистрированное сетью нейтронных мониторов 20 января 2005 г., было рекордным за всю историю 50-летних наблюдений (Белов и др., 2005; Бибер и др., 2005; Вашенюк и др., 2005; Мораал и др., 2005; Симнетт, 2006). Анизотропный приход солнечных протонов с энергией >450 МэВ наблюдался более 30 мин после начала возрастания. В наиболее благоприятном положении для наблюдения находились НМ Южный Полюс (South Pole, SOPO) и Макмердо (McMurdo, MCMMD), расположенные в Антарктиде и показавшие максимальное возрастание примерно в $06:54 \pm 1$ мин UT. В момент анизотропного возрастания НМ показатель жесткого спектра протонов вблизи Земли был равен -5 (Бибер и др., 2005). Для интерпретации данных НМ Саиз с соавторами (2005) предположили инжекцию релятивистских протонов в межпланетное пространство, начиная с $06:49 \pm 1$ UT (максимум инжекции в $06:52 \pm 2$ мин UT). В их модели распространения протонов до Земли использовалась длина свободного пробега 0.9 ± 0.1 а.е. в анизотропной фазе и 0.6 ± 0.1 а.е. позднее.

Солнечные протоны в диапазоне энергий 80–165 и 165–500 МэВ по данным геостационарного спутника GOES (<http://spidr.ngdc.noaa.gov>) показали чрезвычайно быстрое и практически одновременное начало возрастания над фоном (рис. 2б). Спектр протонов был необычайно жестким (положительный показатель) и указывал на эффекты дисперсии по скоростям. Временные вариации спектра свидетельствовали о возможной

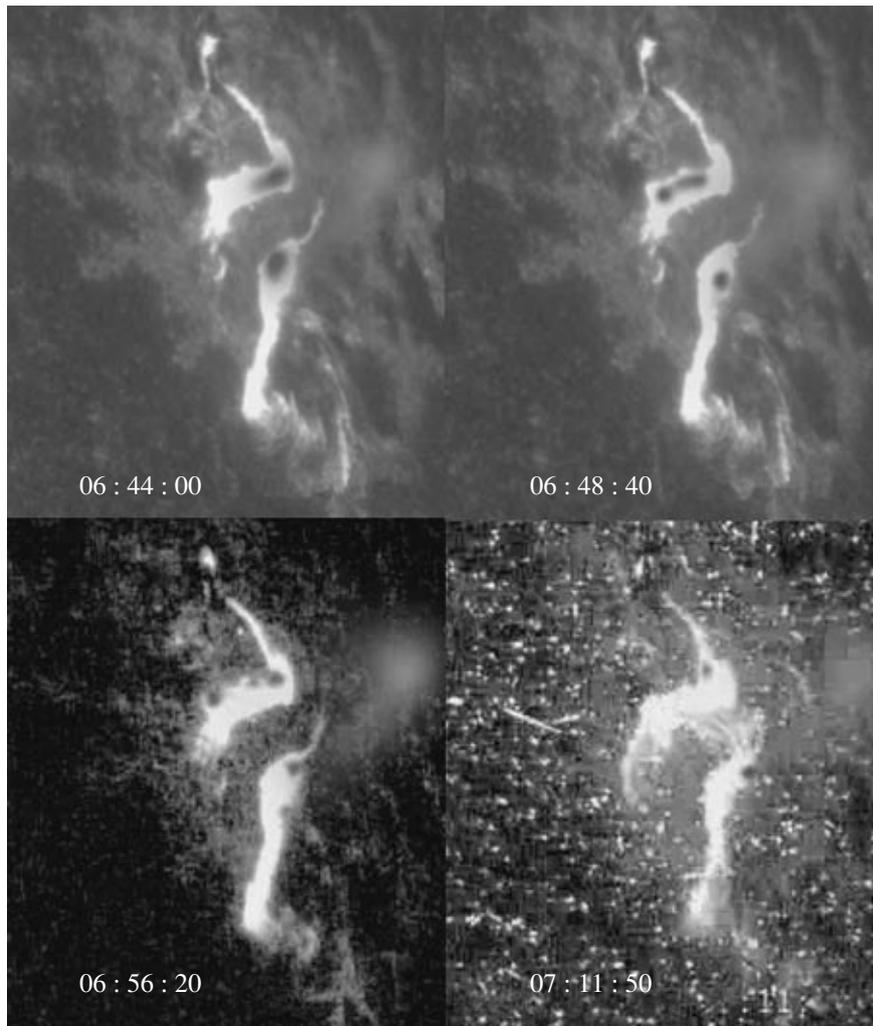


Рис. 1. Кадры визуализации вспышки 20 января 2005 г. в рентгеновском, гамма (RHESSI) и ультрафиолетовом (TRACE) диапазонах в различные моменты времени.

дополнительной инъекции протонов примерно 07:21 UT (Струминский, 2005б).

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ACS SPI

ACS SPI регистрирует первичные и вторичные гамма-кванты с энергией >150 кэВ. В момент солнечной вспышки 20 января 2005 г. счет ACS был выше фона и имел три ярко выраженных максимума, которые коррелируют с особенностями микроволнового излучения (рис. 2а). Фон вторичных гамма-квантов, созданный предыдущими событиями, превышал примерно в три раза типичные фоновые значения (рис. 3а, б). Это затрудняет детальное исследование характеристик гамма-излучения в этом событии (частное сообщение Гросс М., 2005).

Сравнение темпа счета ACS с интенсивностью протонов в каналах 80–165 и 165–500 МэВ (рис. 2б) показывает, что после начала протонного возрастания возможен вклад вторичных

частиц, генерированных солнечными протонами внутри детектора. Отметим, что при постоянной и достаточно большой интенсивности протонов GOES счет ACS практически не меняется, т.е. является преимущественно результатом вторичных частиц. При этом интенсивность протонов равная $1 \text{ (см}^2 \text{ с стер МэВ)}^{-1}$ в канале 80–165 МэВ должна соответствовать генерации примерно 8746 импульсов. Очевидно, что первичные солнечные гамма-кванты вызвали первое возрастание над фоном, а роль относительного вклада первичных и вторичных гамма-квантов в момент второго и третьего пика ACS требует дополнительного исследования.

На рис. 2в сравнивается темп счета ACS за вычетом фона (~ 15 100 импульсов) и предполагаемого вклада протонов с энергией 80–165 МэВ. Видно, что в этом случае второй пик ACS опережает приход релятивистских протонов, а третий

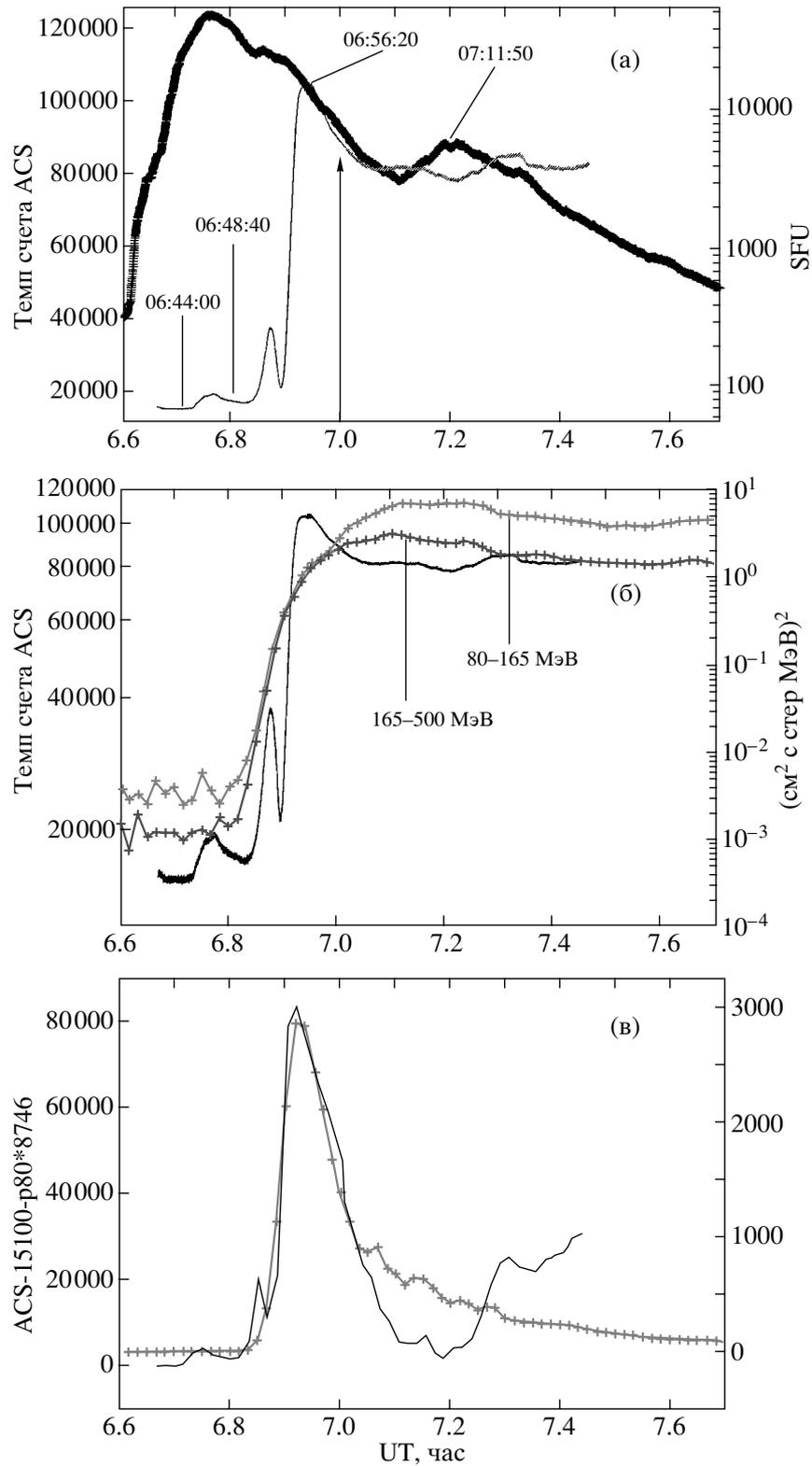


Рис. 2. Сравнение различных временных профилей события 20 января 2005 г.: (а) — радиоизлучение 8.8 ГГц, обсерватория Лирмонф (Leamonth) и темп счета ACS; (б) — протоны GOES 80–165 и 165–500 МэВ и темп счета ACS; (в) — темп счета ACS (за вычетом фона и возможного вклада протонов 80–165 МэВ) и вариаций НМ Макмердо (McMurdo, MSMD).

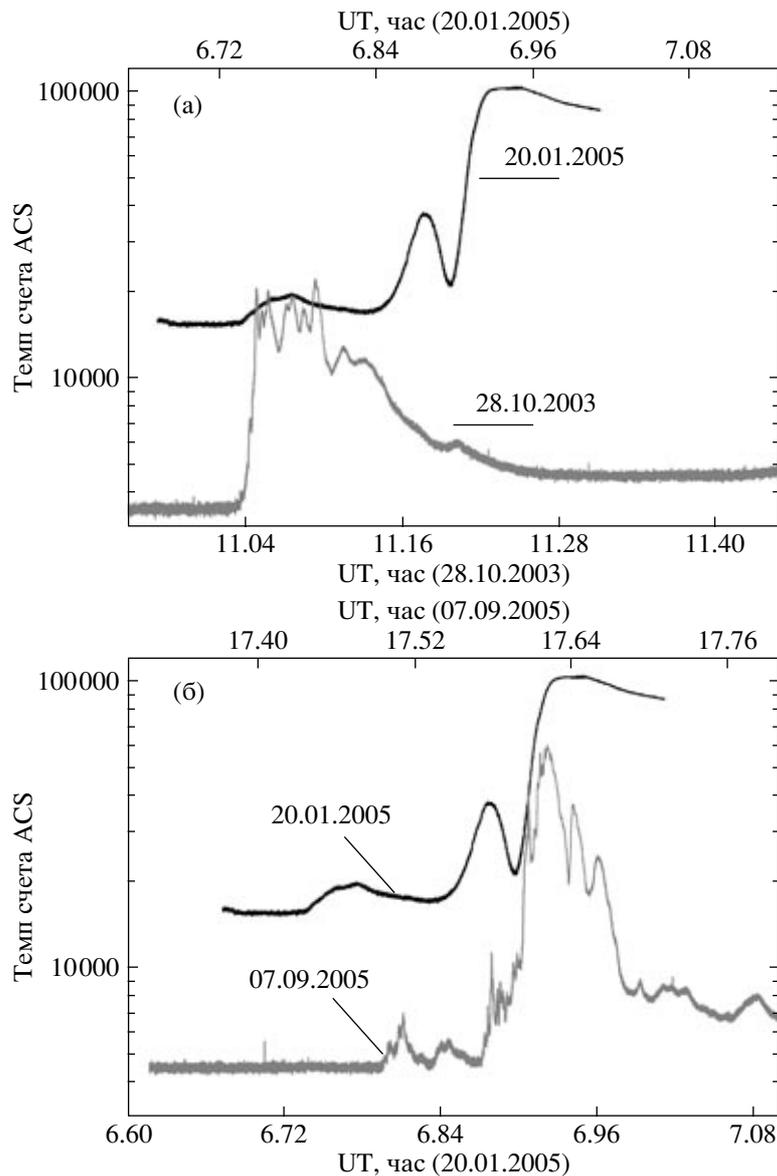


Рис. 3. Сравнение темпов счета ACS в событиях: (а) — 28 октября 2003 г. и 20 января 2005 г.; (б) — 20 января и 7 сентября 2005 г.

пик практически полностью совпадает с анизотропным возрастанием НМ Макмердо. Также появились явные указания на существование четвертого возрастания, связанного со вторым максимумом радиоизлучения и вторым СМЕ. Третий и самый большой пик темпа счета ACS вызван как вторичными гамма-квантами, образовавшимися в результате взаимодействия релятивистских солнечных протонов с детектором, так и первичными гамма-квантами солнечного происхождения.

Вспышка 28 октября 2003 г. — первое солнечное событие, исследованное подробно с помощью приборов ИНТЕГРАЛа (см. Кинер и др., 2006). Возрастание ACS 28 октября 2003 г. содержало информацию о ядерных процессах на Солнце и

было использовано для моделирования солнечного нейтронного события (Струминский, 2005а). Оно по длительности и интенсивности совпадает с первым пиком ACS 20 января 2005 г. (рис. 3а). Событие 7 сентября 2005 г. интересно тем, что произошло вблизи восточного лимба Солнца. Солнечные протоны пришли с большим запаздыванием, обеспечив идеальные условия для наблюдения солнечных гамма-лучей на поздней стадии вспышки.

Временные профили на рис. 3б показаны относительно начала рентгеновских вспышек (см. таблицу); видно, что третий пик ACS 20 января 2005 г. вполне мог включать в себя событие типа 7 сентября.

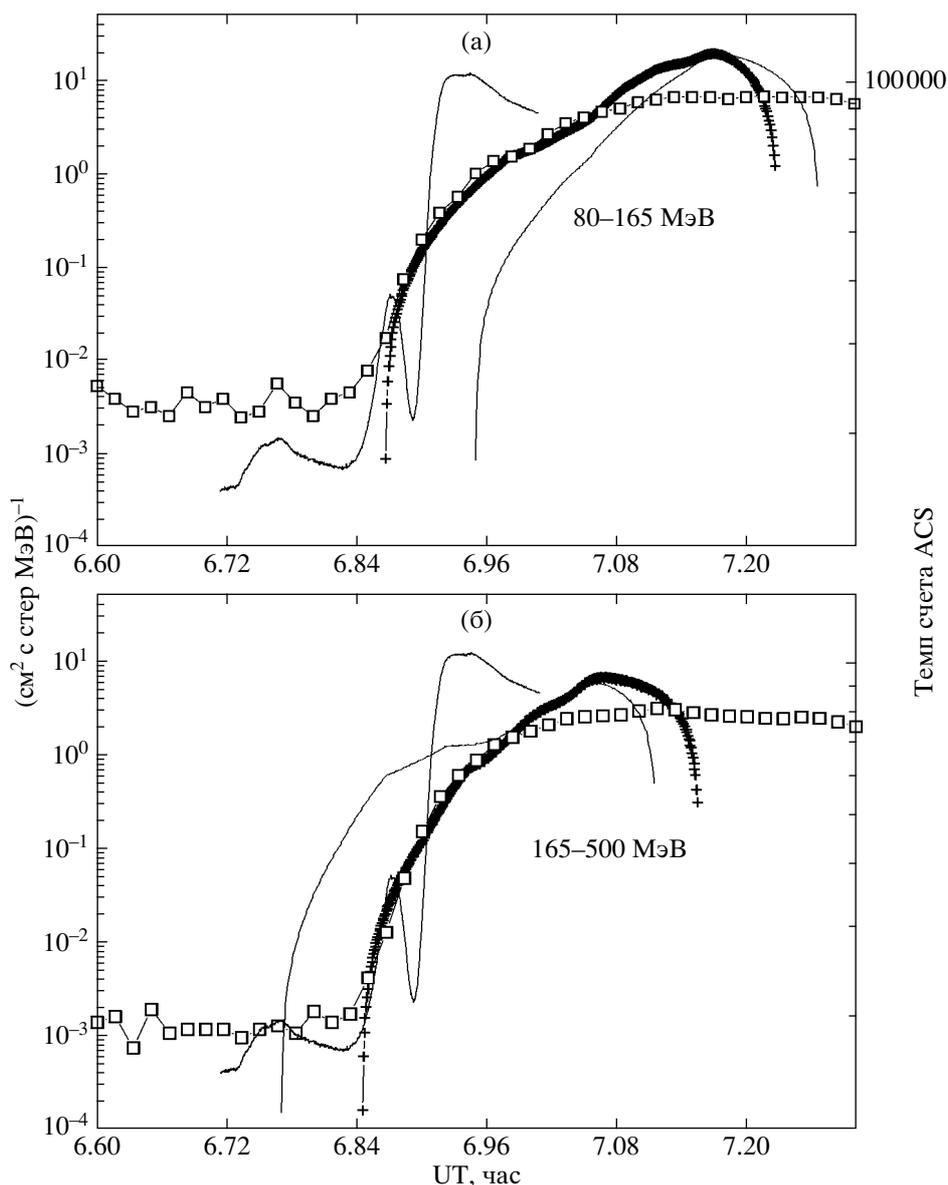


Рис. 4. Сравнение интенсивности солнечных протонов с энергией 80–165 МэВ (а) и 165–500 МэВ (б) в модели свободного распространения (кресты) с наблюдениями GOES (1-мин средние, открытые квадраты). Показан темп счета ACS, который определяет зависимость функции инжекции от времени. Черные линии соответствуют более поздней (ранней) инжекции протонов 80–165 МэВ (165–500 МэВ).

Далее темп счета ACS используется для моделирования возрастания интенсивности солнечных протонов.

РАСЧЕТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Модель свободного распространения солнечных протонов

Наблюдения солнечной вспышки и солнечного протонного события дают основания рассматривать следующую модель выхода и распространения протонов в межпланетном пространстве: функция

инжекции протонов является произведением темпа счета ACS (временная часть) и степенного спектра протонов (энергетическая часть); протоны распространяются без рассеяния и проходят до Земли расстояние ~ 1.2 а.е.

На основании этой модели рассчитывается интенсивность солнечных протонов, которая должна наблюдаться в диапазоне энергий 80–165 и 165–500 МэВ на спутнике GOES примерно первые полчаса после начала возрастания (соответствует анизотропной фазе наземного возрастания на НМ). Показатель энергетического спектра прото-

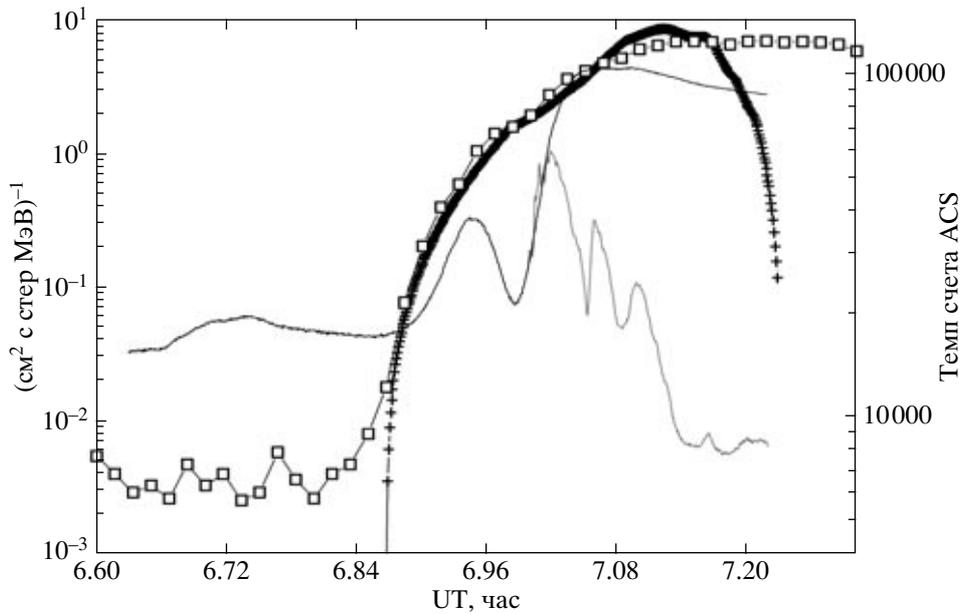


Рис. 5. Сравнение интенсивности протонов 80–165 МэВ в модели свободного распространения (кресты) с наблюдениями (1-мин средние, открытые квадраты) в случае измененной функции инжекции. После 06:53:42 UT используются данные ACS от 7 сентября 2005 г. (серая кривая).

нов вблизи Солнца мы находим путем подбора с шагом 0.05, принимая за нулевую итерацию значение, равное -5 .

Рисунок 4 показывает результаты такого моделирования. Протоны 80–165 МэВ (рис. 4а) начали выходить в межпланетное пространство в 06:43:80 UT с дифференциальным энергетическим

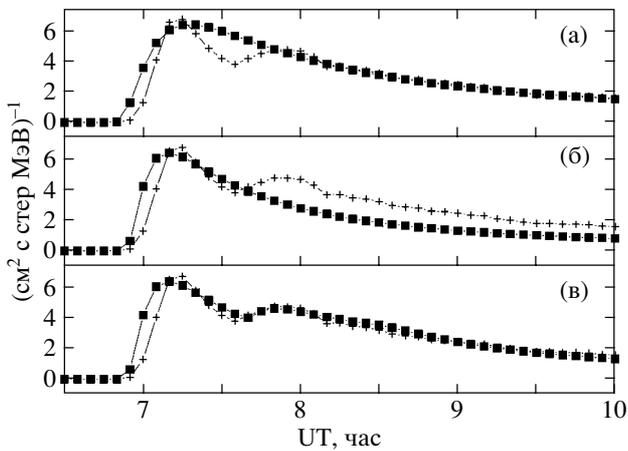


Рис. 6. Сравнение расчетной интенсивности протонов 80–165 МэВ в различных моделях диффузионного распространения (черные квадраты) с наблюдениями (5-мин средние, кресты): (а) — модель с одной мгновенной инжекцией и длиной свободного пробега 0.3 а.е.; (б) — модель с одной мгновенной инжекцией и длиной свободного пробега 0.5 а.е.; (в) — модель с двумя мгновенными инжекциями и длиной свободного пробега 0.5 а.е.

спектром $\sim E^{-4.8}$. Примерно в 06:50:12 UT для лучшего согласия с экспериментом необходимо предположить изменение показателя степенного спектра (он стал жестче, $\sim E^{-4.6}$). Это соответствует ускорению в момент второго пика темпа счета ACS. Протоны 165–500 МэВ (рис. 4б) начали выходить в межпланетное пространство в 06:47:30 UT с аналогичными вариациями энергетического спектра. Максимум инжекции на Солнце релятивистских протонов (Саиз и др, 2005) соответствует второму пику ACS. Отметим, что согласно Симметту (2006) релятивистские электроны вышли в межпланетное пространство на 5 мин позже, чем релятивистские протоны.

Так как нормировочный множитель степенного спектра оставался постоянным при изменении показателя спектра, то соотношение между числом протонов, вышедших в межпланетное пространство, и темпом счета ACS увеличилось в 2–3 раза, что означает изменение условий выхода протонов или генерации гамма-излучения на Солнце.

Если использовать третий пик ACS в качестве продолжения временной части функции источника, то наблюдается расхождение примерно в два раза между моделью и экспериментом как для протонов 80–165 МэВ, так и для 165–500 МэВ (рис. 4а, б).

Заметим, что максимальный темп счета ACS 20 января 2005 г. примерно в два раза больше, чем наблюдавшийся в событии 7 сентября 2005 г. (рис. 3б). Изменим функцию инжекции и будем использовать, начиная с момента времени 06:53:52 UT, данные для события 7 сентября

2005 г., которые показаны на рис. 5 серой кривой. Видно, что результаты расчета с измененной функцией инжекции согласуются с экспериментом еще примерно в течение 10 мин (рис. 5). Зная интенсивность протонов в канале 80–165 МэВ и максимальный счет ACS в модели, которые равны соответственно $0.131 \text{ (см}^2 \text{ с стер МэВ)}^{-1}$ и 60 000 импульсов в момент третьего пика, можно оценить вклад вторичных гамма-квантов от релятивистских протонов. В этом случае рекордное GLE, скорее всего, связано с уникальными условиями выхода и распространения протонов в межпланетном пространстве.

Для описания временного профиля интенсивности протонов в канале 80–165 МэВ необходимо предположить, по крайней мере, три эпизода выхода протонов в межпланетное пространство, которые связаны с высокоэнергичными процессами в солнечной атмосфере. Эти эпизоды отличаются друг от друга абсолютной интенсивностью, спектром, максимальной энергией, отношением числа протонов и электронов, вышедших в межпланетное пространство. Они не связаны с удержанием в ловушке одной и той же группы частиц, так как энергия и интенсивность частиц росли со временем. Возможность реализации на одной ударной волне CME, распространяющейся от Солнца, нескольких этапов ускорения, различающихся по своей интенсивности в разы, также представляется маловероятной. Таким образом, речь идет о нескольких эпизодах ускорения частиц в одной солнечной вспышке.

Модель диффузионного распространения солнечных протонов

Примерно через 30 мин после начала GLE потока релятивистских протонов не наблюдается, и модель свободного распространения протонов для меньших энергий заведомо не работает. Поэтому для исследования события на больших масштабах времени (второй максимум интенсивности протонов 80–165 МэВ) и исследования баланса между условиями распространения и свойствами источника мы используем модель диффузионного распространения (Струминский, 2003а).

Результаты аппроксимации 5-мин данных канала 80–165 МэВ в рамках такого подхода представлены на рис. 6. Предполагая длину свободного пробега равной 0.3 а.е., необходимо практически мгновенно инжектировать в межпланетное пространство 2.8×10^{32} протонов с энергией больше 100 МэВ в 06:42 UT \pm 5 мин. Такая модель хорошо описывает первый максимум и длительный спад интенсивности, но не провал между первым и вторым максимумами (рис. 6а). При длине свободного пробега 0.5 а.е. и инжекции такого же количества

протонов в 06:46 UT \pm 5 мин интенсивность протонов спадает слишком быстро (рис. 6б). Однако если предположить вторую дельта-инжекцию 5.9×10^{31} протонов в \sim 07:30 UT, что соответствует постэруптивной фазе после второго CME, то удастся промоделировать как два максимума интенсивности протонов, так и длительное падение их интенсивности. Таким образом, в рассматриваемом событии в межпланетное пространство вышло примерно 3.4×10^{32} протонов с энергией >100 МэВ. Эта величина сравнима с аналогичными оценками для мощнейших протонных событий 29 сентября и 19 октября 1989 г. (Струминский, 2003а), 14 июля и 8 ноября 2000 г. (Струминский, 2003б), но не является выдающейся. В этом случае рекордное GLE скорее всего вызвано только уникальными условиями распространения протонов в межпланетной среде.

В модели диффузионного распространения при неопределенности длины свободного пробега мы не можем различить первые три эпизода ускорения. Длительный спад в области больших энергий Саиз и др. (2005) моделируют, изменяя условия распространения в межпланетной среде и не рассматривая возможный вклад длительной инжекции. Однако есть все основания считать, что было несколько инжекций и в области релятивистских энергий протонов. Согласно наблюдениям Мораал и др. (2005) на НМ Санае (Sanae) было три максимума (06:54, 07:07, 07:24 UT), которые коррелируют по времени с предложенными эпизодами инжекции протонов. Как изменится вывод Саиз и др. (2005) об условиях распространения протонов в межпланетной среде, если использовать длительную инжекцию?

ВЫВОДЫ

1. Совместный анализ изображений TRACE, RHESSI и временного профиля радиоизлучения (Лирмонф), ACS SPI в событии 20 января 2005 г. показывает, что создание системы постэруптивных петель сопровождалось последовательными энерговыделениями и ускорением заряженных частиц различной энергии. Возможно, что совокупность таких элементарных событий формирует все многообразие наблюдаемых характеристик солнечных вспышек.

2. 20 января 2005 г. сформировались условия для свободного выхода протонов из области ускорения и их распространения практически без рассеяния до Земли первые 30 мин развития события.

3. Временные профили интенсивности солнечных протонов с энергией более 80 МэВ вблизи Земли определялись временным профилем источника на Солнце и его энергетическим спектром.

4. Предполагая, что функции инжекции протонов в диапазоне 80–165 МэВ отлична от нуля начиная с 06:43:80 UT и является произведением темпа счета ACS SPI (временная часть) и степенного спектра протонов $\sim E^{-4.7 \pm 0.1}$ (энергетическая часть), а протоны проходят до Земли без рассеяния расстояние порядка ~ 1.2 а.е., удается получить разумное согласие между модельным расчетом и наблюдениями GOES.

5. Протоны с энергией 165–500 МэВ были инжектированы на 4 мин позже в 06:48 UT примерно с таким же энергетическим спектром.

6. Темп счета ACS SPI несет в себе информацию о солнечных протонах, непосредственно взаимодействующих в атмосфере Солнца. Необходимо создание базы данных солнечных событий ИНТЕГРАЛа и их детальное исследование.

Рисунок 1 сделан на основе визуализации NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio. Автор благодарен А.В. Белову, Морису Гроссу (Maugice Gross), А.А. Лутовину и И.М. Чертку за оперативное предоставление данных и комментарии к ним. Работа выполнена при частичной поддержке программы РАН “Нестационарные явления в астрономии”, гранта Президента РФ (НШ-1739.2003.2), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05-02-17105а, 05-02-26916з).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов и др. (V.V. Akimov, P. Ambroz, A.V. Belov, et al.), *Solar Phys.* **166**, 107 (1996).
- Белов и др. (A.V. Belov, E.A. Eroshenko, H. Mavromichalaki, et al.), *29th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC)*, Pune **1**, 189 (2005).
- Бибер и др. (J.W. Bieber, W.H. Matthaeus, C.W. Smith, et al.), *Astrophys. J.* **420**, 294 (1994).
- Бибер и др. (J.W. Bieber, J. Clem, P. Evenson, et al.), *29th ICRC*, Pune **1**, 237 (2005).
- Вашенюк и др. (E.V. Vashenyuk, Yu.V. Balabin, V.B. Gvozdevsky, et al.), *29th ICRC*, Pune **1**, 209 (2005).
- Кинер и др. (J. Kiener, M. Gros, V. Tatischeff, and G. Weidenspointner), *Astron. Astrophys.* **445**, 725 (2006).
- Ковальцов и др. (G.A. Kovaltsov, I.G. Usoskin, L.G. Kocharov, et al.), *Solar Phys.* **158**, 395 (1995).
- Кочаров и др. (L.G. Kocharov, G.A. Kovaltsov, G.E. Kocharov, et al.), *Solar Phys.* **150**, 267 (1994).
- Кочаров и др. (L. Kocharov, H. Debrunner, G. Vovaltsov, et al.), *Astron. Astrophys.* **340**, 257 (1998).
- Крюкер и др. (S. Krucker, G.J. Hurford, and R.P. Lin), *Am. Geophys. Union, Fall Meet. 2005*, abstract #SH21A-01 (2005).
- Кузнецов и др. (S.N. Kuznetsov, V.G. Kurt, B.Yu. Yushkov, et al.), *29th ICRC*, Pune **1**, 49 (2005).
- Марфи и др. (R.J. Murphy, G.H. Share, D.M. Smith, et al.), *Am. Geophys. Union, Fall Meet. 2005*, abstract #SH23A-0311 (2005).
- Мораал и др. (H. Moraal, K.G. McCracken, C.C. Schoeman, and P.H. Stoker), *29th ICRC*, Pune **1**, 221 (2005).
- Рамати, Манджавидзе (R. Ramaty and N. Mandzhavidze), *Highly Energetic Physical Processes and Mechanisms for Emission from Astrophysical Plasmas*, IAU Symp. **195** (Ed. P.C.H. Martens, S. Tsuruta, 1999).
- Райан (J.M. Ryan), *Space Sci. Rev.* **93**, 581 (2000).
- Римс (D.V. Reams), *Space Sci. Rev.* **90**, 413 (1999).
- Саиз и др. (A. Saiz, D. Ruffolo, M. Rujiwarodom, et al.), *29th ICRC*, Pune **1**, 229 (2005).
- Симнетт (G.M. Simnett), *Astron. Astrophys.* **445**, 715 (2006).
- Струминский А., *Астрон. журн.* **47**, 916 (2003а).
- Струминский (A. Struminsky), *28th ICRC*, Tsukuba **6**, 3419 (2003б).
- Струминский (A. Struminsky), *29th ICRC*, Pune **1**, 45 (2005а).
- Струминский (A. Struminsky), *29th ICRC*, Pune **1**, 201 (2005б).
- Струминский и др. (A. Struminsky, M. Matsuoka, and K. Takahashi), *Astrophys. J.* **429**, 400 (1994).