Электроны солнечных космических лучей, вспышки и корональные выбросы вещества: взаимосвязи по данным мультиспутниковых наблюдений

В.Г. Столповский[1], Е.И. Дайбог[1], К. Кечкемети[2], Г. Эрдеш[2]

[1] Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына Московского государственного университета, Москва
[2] KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics, Budapest, Hungary

Весьма популярная в последнее время точка зрения о том, что все крупные продолжительные возрастания интенсивности солнечных космических лучей (СКЛ) обусловлены ускорением частиц не во вспышках, а на ударных волнах, инициированных корональными выбросами вещества (CME), в основном, использует результаты экспериментального изучения взаимосвязи протонной и ядерной компонент СКЛ со структурой и эволюцией CME и ударных волн. В случае энергичных электронов СКЛ такие взаимосвязи исследованы недостаточно подробно. В работе рассматриваются события в СКЛ, которые наблюдались как после вспышек и CME, ассоциированных по времени и области возникновения на Солнце, так и после вспышек, не сопровождавшися CME и ударными волнами. Наблюдения осуществлялись в интервале гелиоцентрических расстояний ~0.3-1.5 а.е. и гелиодолгот ~120E-120W. Были проанализированы временные зависимости интенсивности и спектры электронов с энергией в интервале ~0.3-2.0 МэВ в ~200 событиях (по ~100 каждого типа), которые, в основном, имели место вблизи максимумов 21 и 22 циклов солнечной активности. В 73 случаях оказалось возможным сопоставить данные наблюдений СКЛ в различных точках межпланетного пространства.

Получено, что: (1) в случае вспышек без CME и ударных волн размер источника электронов СКЛ (cone of emission) составляет ~40W,E. Полная ширина распределения электронных событий, связанных с CME и вспышками, по долготе составила ~150W,E. Наблюдение электронных событий на таких больших угловых расстояниях от "родительской" вспышки еще труднее, чем в случае протонных событий, объяснить без привлечения ускорения частиц на ударных волнах вблизи Солнца;

(2) в случае возрастания потоков электров, ассоциированных со вспышками и CME, задержка по времени между моментом инжекции электронов на магнитную силовую линию точки наблюдения и началом возмущения на Солнце определяется временем распространения ударной волны в короне до магнитной силовой линии точки наблюдения (коэффициент корреляции ~0.8). Время нарастания интенсивности электронов увеличивается со скоростью CME - V (коэффициент корелляции ~0,7-0,8). Величина коэффициента корреляции между характерными временами электронных возрастаний и скоростью V не зависит от длительности (высоты) вспышки;

(3) были рассмотрены интегральные энергетические спектры электронов, построенные по максимальным значениям интенсивности электронов с данной

энергией в событии. Для "чисто" вспышечных электронных возрастаний интервал изменения показателя спектра s - от 2.8 до 5.0, среднее значение показателя $< s >$~3.5, наклон спектра не зависит от углового расстояния между источником и наблюдателем. Для событий, связанных с CME, ситуация сложнее: полная ширина распределения по s - 1.3-5.0 и наклон спектра увеличиваются с увеличением углового расстояния. В случае событий, наблюдавшихся на угловых расстояниях меньше половины углового размера CME, распределение по величине s более узкое и $< s >$~1.9. Были построены распределения по s для событий с V<700 и >700 км/с и получено, что в случае малых V показатель s лежит в пределах от ~3-5.0, в случае больших V - ~1.3-3. Это означает, что между наклоном спектра электронов и скоростью CME при ее изменении в интервале ~300-2000 км/с реализуется сильная статистическая связь (коэффициент корреляции 0.8-0.9). Такую зависимость s от V можно понять, если учесть, что эффективность ускорения частиц на ударной волне уменьшается при уменьшении ее скорости V. Для средней модели солнечной атмосферы максимум альвеновской скорости(Va~350 км/с) приходится на высоту ~1-2 Rs и для ускорения необходимо, чтобы транзиент имел скорость >350 км/с. Чем больше скорость транзиента, тем больше число Альвена-Маха, и частицы могут быть ускорены до большей скорости, что приводит к более жесткому спектру. На больших угловых расстояниях, т.е. далеко на флангах ударной волны, ее скорость V уменьшается, что приводит к уменьшению эффективности ускорения и увеличению наклона спектра энергичных электронов.

Установленные экспериментальные факты укладываются в схему ускорения электронов на ударной волне, связанной с CME. В то же время получено, что максимальная интенсивность энергичных электронов Jm в событиях, обусловленных ассоциациями" CME-вспышка", связана и с параметрами вспышки (баллом всплеска в мягком и флюенсом всплеска в жестком рентгеновском излучении). Коэффициент корреляции Jm и приведенными параметрами вспышки составляет ~0.5-0.6. Такой же коэффициент корреляции между Jm и V. Это не позволяет исключить вспышку как еще один источник электронов в событиях СКЛ после ассоциаций CME-вспышка, особенно в случае оптимальной связи точки наблюдения с источником на Солнце. Было получено, что в случае вспышек, не сопровождающихся CME и ударными волнами, коэффициент корреляции между амплитудой потока в событиях СКЛ и баллом всплеска в тепловом X-излучении ~0.7, и зависимость между этими величинами близка к линейной. Используя полученную зависимость, мы оценили вклад электронов, ускоренных в импульсной фазе вспышек в ассоциации с высокоскоростными CME по измерениям теплового рентгеновского излучения и получили, что для событий в оптимальной области гелиодолгот связи он не превышает $\sim 30\%$.