

УДК 523.985+524.1-52:523.9

О СООТНОШЕНИИ СПЕКТРОВ МИКРОВОЛНОВЫХ ВСПЛЕСКОВ НА СОЛНЦЕ И ПОТОКОВ ПРОТОНОВ У ЗЕМЛИ

© 2009 г. И. М. Черток¹, В. В. Гречнев², Н. С. Мешалкина²

¹Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Троицк Московской области, Россия

²Учреждение Российской академии наук Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 12.03.2009 г.; принята в печать 07.04.2009 г.

Анализ экстремального солнечного протонного события 20.01.2005 обострил дискуссию по давно обсуждаемой проблеме: ускоряются ли приходящие к Земле солнечные космические лучи во вспышке или в ударной волне перед быстро распространяющимся корональным выбросом? При этом одним из важных является вопрос о связи между энергетическим спектром солнечных космических лучей и параметрами, характеризующими частотный спектр вспыхивающих микроволновых всплесков. В ряде работ по материалам предшествующих циклов солнечной активности было показано, что такая связь существует, в частности, для протонов с энергией десятки МэВ. В данной работе представлены результаты анализа этой связи по данным 1987–2008 гг. Установлено, что для событий, связанных со вспышками на западной половине диска, имеет место существенная корреляция между индексом δ , эквивалентным показателю степенного интегрального энергетического спектра протонов, зарегистрированных у орбиты Земли в диапазоне 10–100 МэВ, и такими параметрами радиовсплесков, как отношение пиковых потоков S на двух частотах (например, 9 и 15 ГГц) и частота спектрального максимума f_m . Микроволновым всплескам с жестким частотным спектром (у которых $S_9/S_{15} \leq 1$, $f_m \geq 15$ ГГц) соответствуют потоки протонов с жестким (пологим) энергетическим спектром ($\delta \leq 1.5$). Вспышки же с мягким радиоспектром ($S_9/S_{15} \geq 1.5$, $f_m \leq 5$ ГГц) наоборот приводят к потокам протонов с мягким (крутым) энергетическим спектром ($\delta \geq 1.5-2$). Показано также, что мощные высокочастотные всплески с наиболее жестким радиоспектром ($f_m \approx 30$ ГГц) могут служить информативным индикатором ускорения значительных потоков протонов во вспышках, происходящих в сильных магнитных полях. Эти результаты являются важным аргументом в пользу предположения, что частицы солнечных космических лучей (по крайней мере, их начального импульса) в основном ускоряются во вспышке в процессах импульсного и постэруптивного энерговыделения, а не в ударной волне на фронте коронального выброса.

PACS: 96.60.Tf, 96.60.Ub, 96.60.Vg, 96.50.Ci, 96.50.Vg

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди вопросов, касающихся солнечных космических лучей (СКЛ), одним из наиболее важных, но до сих пор не до конца выясненных и широко обсуждаемых, остается вопрос об источниках их ускорения. Существуют две крайние точки зрения на этот счет. Согласно одной из них, приходящие к Земле потоки протонов ускоряются непосредственно во вспышке в процессе первичного импульсного энерговыделения на небольшой высоте над пятнами, а также в ходе более длительного постэруптивного энерговыделения высоко в короне (см., например, [1–7]). По другой концепции протоны СКЛ ускоряются в ударной волне перед быстро распространяющимся корональным

выбросом массы (КВМ) [8–11]. При этом как одна, так и другая точки зрения поддерживаются целым рядом экспериментальных и теоретических аргументов [12–15].

Дискуссия о происхождении СКЛ обострилась в последние годы в связи с анализом экстремального солнечного протонного события 20.01.2005 (см. многочисленные материалы и статьи на сайте <http://creme96.nrl.navy.mil/20Jan05/>, а также [6, 16]). В частности, в [6] на основе подробного изучения разнообразных данных получены существенные аргументы в пользу ускорения частиц основного импульса наземного возрастания СКЛ (GLE) во вспышке, а не в ударной волне, связанной с КВМ. Показано, что экстремальность данного

события состояла не в параметрах КВМ, а в характеристиках вспышки, произошедшей в сильных магнитных полях над пятнами, что проявилось, в частности, в мощнейшем жестком микроволновом радиовсплеске (пиковые потоки на частотах 17 и 35 ГГц $S > 80\,000$ sfu¹, частота спектрального максимума $f_m \approx 30$ ГГц). Кроме того, временной профиль первого мощного анизотропного импульса GLE соответствовал по времени и был близок по форме профилю высокоэнергичного (энергия фотонов > 60 МэВ) пионного гамма-излучения, возбуждаемого ускоренными во вспышке протонами с энергией > 300 МэВ (см. также [17]).

Для протонных событий, связанных со вспышками на западной половине солнечного диска, во многих работах разных лет обнаружена достаточно высокая корреляция потоков протонов разных энергий у Земли с интенсивностью электромагнитного излучения вспышек в различных диапазонах, в частности, с пиковым и интегральным потоками микроволновых всплесков [18–21], с потоком в мягком рентгеновском диапазоне [22–23] и с флюенсом линейчатого гамма-излучения в диапазоне 4–7 МэВ [24, 25]. Сделанный отсюда вывод о том, что указанные корреляции свидетельствуют об ускорении СКЛ во вспышках, был поставлен под сомнение в [26]. Согласно [26], такие корреляции могут быть объяснены так называемым “синдромом большой вспышки”. Он сводится к утверждению, что любые параметры, даже заведомо не связанные между собой физически, но отражающие энергетику вспышки, будут хорошо коррелировать. В концепции ускорения СКЛ на ударных волнах это предполагает, что более сильные вспышки сопровождаются более крупными и высокоскоростными КВМ, а значит, и более сильными ударными волнами, которые способны ускорить большее количество частиц до больших энергий. В пользу вспышечного происхождения СКЛ могла бы свидетельствовать корреляция между более тонкими количественными параметрами, например, такими, которые характеризуют спектр вспышечных излучений, с одной стороны, и энергетический спектр СКЛ — с другой. Тесная связь между такого рода параметрами вряд ли может быть объяснена в рамках “синдрома большой вспышки”.

В ряде работ [25, 27–29] показано, что имеет место корреляция между характеристиками частотного спектра микроволновых всплесков, отражающими энергетический спектр ускоренных во вспышке и генерирующих радиовсплески электронов, и параметрами энергетического спектра потоков протонов у Земли с энергией десятки МэВ. В частности, в [28, 29] это было сделано по западным

событиям 1966–1986 гг., т.е. 20-го и 21-го солнечных циклов. При этом в качестве параметров радиоспектра брались отношение пиковых потоков микроволновых всплесков на частотах вблизи 9 и 15 ГГц (S_9/S_{15}) и частота спектрального максимума f_m , а потоки протонов характеризовались показателем δ интегрального степенного энергетического спектра $J_E \propto E^{-\delta}$. Оказалось, что, как и следовало ожидать в случае вспышечного происхождения СКЛ, вспышки с жестким радиоспектром (т.е. при $S_9/S_{15} < 1$ и (или) $f_m \geq 15$ ГГц) сопровождаются потоками протонов с жестким энергетическим спектром ($\delta \leq 1.0–1.5$), а потоки протонов с наиболее мягким энергетическим спектром ($\delta \geq 2$) связаны со вспышками, имеющими мягкий частотный спектр микроволновых всплесков ($S_9/S_{15} > 1.5$ и (или) $f_m \leq 5$ ГГц).

Цель настоящей работы — проверить эти важные корреляции и закономерности по новым данным 1987–2008 гг., т.е. 22-го и 23-го циклов активности. Анализ подтвердил наличие статистической связи между спектрами микроволновых всплесков на Солнце и потоков протонов у Земли. Кроме сопоставления спектров микроволновых всплесков и потоков протонов, проведен также анализ соотношения между мощными высокочастотными радиовсплесками на $f \approx 35$ ГГц и сильнейшими протонными событиями.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Для рассматриваемого периода 1987–2008 гг. имеется довольно полный набор наблюдательных данных по солнечным вспышкам, возникающим в связи с ними радиовсплескам и соответствующим потокам протонов у Земли. Основой для анализа послужили каталог солнечных протонных событий за 1987–1996 гг. [30] и список NOAA, охватывающий весь интересующий нас период до 2008 г. (см. сайт <http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/seps.html>). Широко использовались также временные профили потоков протонов у Земли, регулярно измеряемые на геостационарных спутниках GOES в энергетических каналах $E > 10, 50$ и 100 МэВ (графические файлы таких профилей за любые три дня можно найти на сайте <http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html>). По этим материалам с учетом имеющейся дополнительной информации выделены четкие возрастания СКЛ с потоком протонов в канале $E > 10$ МэВ, превышающим $J_{10} \approx 5$ pfu², и с обнаружимым подъемом над

¹ 1 sfu = 10^{-22} Вт м⁻² Гц⁻¹ (солнечная единица потока, с.е.п.)

² Поток протонов измеряется в единицах 1 pfu = $= 1$ прот. см⁻² с⁻¹ ср⁻¹.

фоном в канале $E > 100$ МэВ до уровня $J_{100} \geq 0.03 - 0.05$ rfu. В случаях, когда четкие возрастания регистрировались как 10 МэВ, так и на 100 МэВ, рассматривались и несколько более слабые события. Все анализируемые пиковые величины потоков протонов измерялись по 5-мин данным GOES.

Для дальнейшего анализа отбирались протонные возрастания, источниками которых были вспышки на западной половине солнечного диска, т.е. на гелиодолготах W00–W90. Как известно, именно для таких событий параметры протонных возрастаний и характер их связи с излучением вспышек не сильно искажаются гелиодолготными эффектами распространения СКЛ. Среди западных прилимитовых событий ($W \approx 90^\circ$) для анализа взяты только те, для которых не было обнаружено явных признаков экранирования микроволнового излучения. С другой стороны, в виде исключения в число рассматриваемых включены три крупных наземных протонных возрастания GLE, источниками которых были вспышки, локализованные несколько восточнее центрального меридиана: 19.10.1989 (гелиодолгота E10), 24.08.1998 (E07) и 28.10.2003 (E08).

При сопоставлении радио- и протонных спектров желательнее свести к минимуму влияние на энергетический спектр СКЛ различных эффектов выхода частиц из области ускорения и их распространения в межпланетном пространстве. Поэтому, кроме указанных ограничений по гелиодолготе, в качестве наиболее подходящего для сопоставления со спектром частиц, ускоренных во вспышке, принимался спектр начального, почти свободно распространяющегося и часто анизотропного импульса протонов. На временных профилях западных протонных возрастаний этому импульсу соответствуют в большинстве случаев или быстрый (для $E > 10$ МэВ с временным сдвигом относительно вспышки в пределах нескольких часов) максимум, или достаточно четкая ступенька с небольшой дисперсией в трех используемых энергетических каналах $E > 10, 50$ и 100 МэВ. Сильно затянутые пики на профилях протонных возрастаний, а также максимумы, заведомо совпадающие с внезапным началом геомагнитной бури (SSC), т.е. связанные с приходом к Земле межпланетной ударной волны, не учитывались. В таких случаях поток протонов, в частности в диапазоне 10–50 МэВ, заметно повышается из-за частиц, захваченных внутри межпланетного возмущения. К тому же, во время часто следующих за SSC геомагнитных бурь (особенно сильных) существенно меняются условия регистрации энергичных частиц на космических и наземных мониторах. По этим причинам события, прямо совпадающие с одним или

двумя SSC, например, такие, как 26.11.2000, 9–10.11.2002, 29.05.2003, также не рассматривались.

По аналогии с [5], в качестве параметра, характеризующего энергетический спектр потока протонов, для каждого события измерялась величина $\lg(J_{10}/J_{100})$, где J_{10} и J_{100} — пиковые величины потока протонов в каналах $E > 10$ и 100 МэВ, соответственно. Понятно, что этот параметр в определенной степени эквивалентен показателю δ интегрального степенного энергетического спектра $J_E \propto E^{-\delta}$ и в дальнейшем будет обозначаться как δ . Отметим еще раз, что речь идет не о мгновенном энергетическом спектре, строго измеряемом в одно время в разных каналах, а о спектре пиковых величин потока протонов, отражающем дисперсию времени прихода к Земле частиц разных энергий.

Для определения параметров, характеризующих частотный спектр микроволновых всплесков, связанных с выделенными протонными вспышками, использовались прежде всего круглосуточные данные мировой сети радиообсерваторий RSTN на частотах 1.4, 2.7, 5.0, 8.8 и 15.4 ГГц. Они публикуются в “Solar-Geophysical Data” (<http://sgd.ngdc.noaa.gov/sgd/jsp/solarindex.jsp>), а также представлены на сайте ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/BURSTS. Информация о всплесках на более высоких частотах 17, 35 и 80 ГГц получена по скорректированным измерениям на радиополяриметрах обсерватории Нобейма (NoRP; см. сайт <http://solar.nro.nao.ac.jp/noRP/>) и, к сожалению, не является круглосуточной. Записи отобранных событий были тщательно просмотрены, и были уточнены значения превышения потока относительно предвсплескового уровня, вычисляемого в автоматическом режиме программой, обслуживающей радиополяриметры. Выполнена коррекция потоков на 80 ГГц, значения которых в период с июня 1999 г. по июнь 2005 г. систематически снижались из-за деградации аппаратуры. В записях NoRP на 35 ГГц для нескольких экстремальных событий имеются интервалы, испорченные из-за перегрузки при очень высоких потоках всплесков. Такие участки записей восстановлены как квадратный корень из произведения временных профилей на 17 и 80 ГГц, а масштабные коэффициенты найдены сшивкой восстановленных кривых с начальными и конечными участками записей на 35 ГГц, зарегистрированными без перегрузки.

За микроволновые всплески ответственны два механизма: гиротронное излучение ускоренных во вспышке электронов и тепловое тормозное излучение вспышечной плазмы [31]. Плотность потока теплового излучения редко превышает 100 sfu, а его спектр в оптически тонкой области (что наиболее вероятно на частотах 9 ГГц

и выше) плоский. Тепловое излучение заметно в слабых радиовсплесках, связанных с достаточно большими рентгеновскими вспышками; в мощных же микроволновых всплесках доминирует гиротронное излучение ускоренных электронов. Поэтому адекватным параметром, характеризующим спектр ускоренных электронов, представляется наклон частотного радиоспектра в оптически тонкой области (правее спектрального максимума f_m) [31]. Однако, как показывает статистический анализ [19], в большинстве микроволновых всплесков $f_m \approx 9 - 15$ ГГц. (Заметим, что в ряде случаев это может быть обусловлено преобладающим излучением вершин всплещечных петель на частотах ниже 15 ГГц.) Следовательно проводимые в круглосуточном режиме измерения на 8.8 и 15.4 ГГц часто не соответствуют оптически тонкой области радиоспектра. Не проясняют ситуацию и наблюдения на радиополяриметрах Нобейма на частотах 17, 35 и 80 ГГц, поскольку, во-первых, они не являются круглосуточными, и, во-вторых, как показано ниже, в крупных протонных событиях параметр f_m смещается к более высоким частотам и может достигать 35 ГГц и более (см. также [6, 18]). Поэтому в данной статье, как и в предшествующих работах [28, 29], параметр энергетического спектра потоков протонов у Земли сопоставлен с другими параметрами частотного спектра микроволновых всплесков: (1) отношением пиковых плотностей потока S на $f = 8.8$ и 15.4 ГГц, которое мы по-прежнему будем обозначать как S_9/S_{15} ; (2) частотой f_m , на которой плотность потока микроволнового радиоизлучения максимальна. Для событий, наблюдавшихся в Нобейме, дополнительно использовался третий параметр — отношение пиковых плотностей потока на более высоких частотах $f = 17$ и 35 ГГц, т.е. S_{17}/S_{35} .

Очевидно, что отношение пиковых потоков на этих парах частот так или иначе характеризует все ту же частоту спектрального максимума микроволновых всплесков f_m . Параметр S_9/S_{15} привлекателен тем, что при существующей сети обсерваторий он легко определяется по общедоступным данным для подавляющего большинства событий и достаточно хорошо отражает как жесткий частотный спектр ($S_9/S_{15} < 1$, $f_m \geq 15$ ГГц), так и относительно мягкий радиоспектр ($S_9/S_{15} > 1$, $f_m \leq 5 - 9$ ГГц). В меньшей степени по указанным выше причинам это относится к параметру S_{17}/S_{35} . Следует иметь в виду, что частота спектрального максимума f_m зависит не только от показателя энергетического спектра излучающих электронов, но и от таких параметров, как напряженность магнитного поля в источнике, число ускоренных во вспышке электронов, угол между направлениями магнитного поля и лучом зрения [31]. Этим в значительной мере определяется разброс точек при корреляции

указанных радиопараметров с индексом энергетического спектра потоков протонов у Земли. При анализе в тех случаях, когда на данной частоте разные обсерватории RSTN дают различающиеся значения потока, в качестве S принималась средняя величина. Значения f_m , как правило, принимались равными одной из указанных выше частот наблюдений без интерполяции. Из-за отсутствия данных на 15.4 ГГц не рассматривались западные события 02-03.01.1988, 08.11.1988, 18.06.1989 и 19.10.1994.

Основная таблица протонных событий — возрастных СКЛ и соответствующих вспышек, для которых проводилось сопоставление спектров, — представлена на сайте http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/Chertok/SEPs_radio/index.html (далее — “Основная таблица”). На этом же сайте приводятся дополнительные иллюстрации, не вошедшие в статью. Для каждого события в “Основной таблице” указаны: номер события; дата и время пика протонного потока, по которому измерялись величины потока в каналах $E > 10$ и 100 МэВ, параметр энергетического спектра $\lg(J_{10}/J_{100})$; максимальный процент наземного возрастания СКЛ по [32], если событие сопровождалось GLE; время максимума микроволнового всплеска, балл и координаты вспышки — источника данного протонного события; максимальные потоки микроволновых всплесков на частотах 8.8 и 15.4 ГГц в единицах sfu, отношение этих потоков S_9/S_{15} ; аналогичные данные обсерватории Нобейма на более высоких частотах 17 и 35 ГГц и, наконец, частота спектрального максимума микроволновых всплесков f_m . В скобках в данной таблице указано значение f_m , найденное по многочастотным записям событий, зарегистрированных NoRP. Оно было вычислено как координата вершины параболы, проведенной через три точки радиоспектра вблизи максимума в координатах $\lg f - \lg S$ в каждый момент времени, и взято наивысшее значение f_m за время всплеска. Вычислить такие уточненные значения f_m для всех событий “Основной таблицы” невозможно, так как наблюдения RSTN ограничены частотой 15.4 ГГц, а доступные через Интернет записи имеются только для анализируемых событий после 2000 г. Для однородности методики интерполяция f_m при анализе не использовалась.

Заметим, что довольно крупное протонное возрастание, последовавшее за западной вспышкой 17.03.1989 (время максимума 17:35 UT, балл 2В/Х6.5, координаты N33 W61), является исключительным, оно не указано в “Основной таблице” и не рассматривается при дальнейшем анализе. Это возрастание имело необычно мягкий энергетический спектр протонов в диапазоне десятков МэВ: во время ступеньки на фазе роста

и в первом максимуме при $J_{10} \approx 170-300$ pfu поток протонов в канале >100 МэВ повысился над фоном не более чем на $J_{100} \approx 0.003$ pfu. Это соответствует спектральному протонному индексу $\delta \geq 4.75$, значительно превышающему величину этого индекса в самых мягких западных протонных событиях $\delta \approx 3.2$. Наиболее вероятная причина исключительности этого протонного события связана с тем, что оно наблюдалось на фазе затухания самой мощной геомагнитной бури с минимальным индексом $D_{st} \approx -589$ нТл 14.03.1989.

3. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ S_9/S_{15} И δ

Соотношение между параметрами протонного энергетического спектра у Земли в диапазоне десятков МэВ $\delta = \lg(J_{10}/J_{100})$ и частотного спектра микроволновых всплесков S_9/S_{15} для 86 рассматриваемых событий за 1987–2008 гг. проиллюстрировано на рис. 1. Здесь крестиками выделены события, которые сопровождались GLE, т.е. имели заметный поток высокоэнергичных протонов на $E \approx 1$ ГэВ. Несмотря на довольно большой разброс, параметры радио- и протонного спектров обнаруживают существенную положительную корреляцию с коэффициентом $r \approx 0.55$. При изменении радиоспектра от жесткого к мягкому (с ростом S_9/S_{15} от 0.3 до 2.5) спектр протонов у Земли также обнаруживает явную тенденцию к изменению от жесткого к мягкому (параметр δ возрастает в среднем от 1.2 до 2.6). Среди 34 протонных событий с наиболее жестким энергетическим спектром ($\delta \leq 1.5$) 24, т.е. примерно 71%, связаны со вспышками, имевшими относительно жесткий частотный спектр микроволновых всплесков ($S_9/S_{15} < 1.5$). С другой стороны, у 20 из 28 протонных событий с наиболее мягким энергетическим спектром ($\delta > 2$), т.е. также примерно в 71% случаев, соответствующий микроволновый всплеск характеризовался мягким частотным спектром ($S_9/S_{15} \geq 1.5$). Если же исходить из вспышечных событий, то в 26 случаях из 36 (72%) микроволновые всплески с наиболее жестким радиоспектром ($S_9/S_{15} < 1$) сопровождались протонными потоками с достаточно жестким спектром ($\delta < 1.75$), и в 19 случаях из 30 (63%) вспышки, у которых микроволновый всплеск имел мягкий радиоспектр ($S_9/S_{15} \geq 1.5$), приводили к протонным событиям с мягким энергетическим спектром ($\delta \geq 2$).

Что касается заметного разброса событий на корреляционной диаграмме рис. 1, то причин для него более чем достаточно. Со стороны микроволновых всплесков это, прежде всего, свойства гиротронного механизма генерации микроволновых всплесков, о которых речь шла в разд. 2, в частности зависимость их частотного спектра не

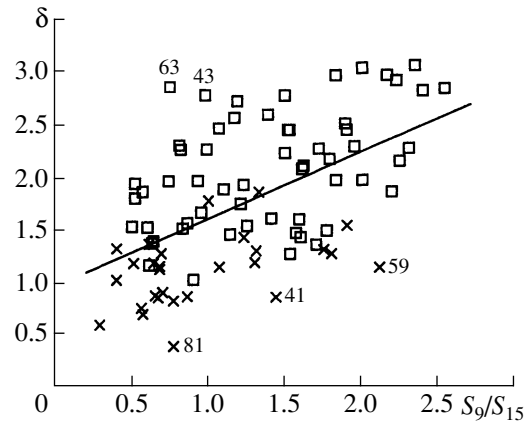


Рис. 1. Корреляция между отношением пиковых потоков вспышечных микроволновых событий на частотах 8.8 и 15.4 ГГц (параметр S_9/S_{15}) и спектральным индексом солнечных потоков протонов (параметр $\delta = \lg(J_{10}/J_{100})$), рассчитанным по измерениям у Земли в каналах $E > 10$ и 100 МэВ. Рассмотрены протонные события за 1986–2008 гг., связанные со вспышками на западной половине диска. Прямая соответствует линейной регрессии. Крестиками выделены события, в которых имели место наземные возрастания высокоэнергичных частиц (GLE). Номера отмечены следующие события (нумерация согласно «Основной таблице»): 41 – 14.07.2000, 43 – 12.09.2000, 59 – 26.12.2001, 63 – 15.07.2002, 81 – 20.01.2005.

только от спектра излучающих электронов, но и от других параметров, например от напряженности магнитного поля в источнике. К тому же до сих пор имеются некоторые расхождения между измерениями максимальных радиопотоков по данным разных обсерваторий. Разброс значений потоков протонов, по-видимому, в наибольшей мере определяется меняющимися от события к событию условиями выхода частиц из источника ускорения и их распространения в короне и межпланетном пространстве.

Возрастания потоков протонов у Земли могут быть связаны не только со вспышками, происходящими в активных областях (АО), но и со вспышечно-подобными процессами, происходящими при эрупции волокон вне АО. Как известно, такие события сопровождаются протонными потоками с более мягким энергетическим спектром при сравнительно слабом микроволновом излучении. В таких радиовсплесках может быть существенным вклад теплового тормозного излучения.

Обратимся к нескольким исключительным событиям, которые отмечены номерами на рис. 1. В событиях 12.09.2000 (43) и 15.07.2002 (63) весьма мягкий протонный спектр ($\delta \approx 2.82$ и 2.9) сочетается с довольно жестким радиоспектром ($S_9/S_{15} \approx 0.98$ и 0.75). Основная причина мягкости протонного спектра в событии 12.09.2000 (как и слабости микроволнового всплеска) состоит в том, что оно

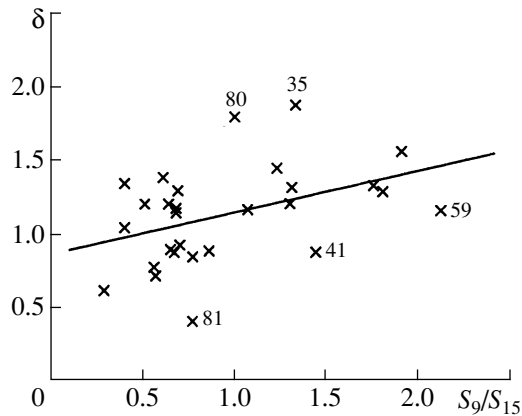


Рис. 2. То же, что на рис. 1, отдельно для GLE-событий. Номерами отмечены события: 35 — 06.05.1998, 41 — 14.07.2000, 59 — 26.12.2001, 80 — 17.01.2005, 81 — 20.01.2005.

как раз и связано с эрупцией крупного волокна вне АО, а жесткость радиоспектра обусловлена значительным тепловым вкладом. К тому же источник этого события находился на гелиодолготе W09, т.е. достаточно далеко от оптимального района, из которого основания открытых силовых линий обычно идут к Земле. В еще большей степени эффект гелиодолготного смягчения спектра протонов, по-видимому, сказался в событии 15.07.2002, обусловленного вспышкой на W01. В пользу такого предположения свидетельствует затянутый временной профиль потока протонов, характерный обычно для восточных вспышек. Без учета этих двух исключительных событий коэффициент корреляции возрастает до $r \approx 0.60$.

Среди протонных возрастных с жестким энергетическим спектром при относительно мягком радиоспектре прежде всего выделяется GLE-событие 26.12.2001 (59), у которого при малом $\delta \approx 1.17$ в диапазоне десятков МэВ радиопараметр составляет $S_9/S_{15} \approx 2.11$. Как отмечается в [32], от остальных GLE за последние три цикла активности это событие отличается самым слабым всплеском мягкого рентгеновского излучения (балл M7.1). Его микроволновое радиоизлучение тоже весьма умеренное ($S_9 \approx 3800$ sfu, $S_{15} \approx 1800$ sfu) при сравнительно низкой частоте спектрального максимума $f_m \approx 7$ ГГц. Это указывает на то, что генерация микроволнового всплеска в данном событии происходила в относительно слабых магнитных полях. Известное GLE-событие “Дня Бастилии” 14.07.2000 (41) характеризуется достаточно жестким протонным спектром ($\delta \approx 0.89$) при не очень жестком радиоспектре ($S_9/S_{15} \approx 1.44$). Такой характер радиоспектра связан, вероятно, с развитым постэруптивным энерговыделением, что проявилось, в частности, в одной из самых

протяженных вспышечных аркад в мягком рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах [33]. Экстремальное GLE-событие 20.01.2005 (81) характеризуется самым жестким протонным спектром в диапазоне десятков МэВ, хотя радиоспектр в диапазоне 8.8–15.4 ГГц выглядит средним по жесткости ($S_9/S_{15} \approx 0.77$), но, как уже отмечалось, на более высоких частотах [6] наблюдался мощнейший радиовсплеск. Причина этого расхождения — насыщение радиометра RSTN на 15.4 ГГц. Отношение $S_{9.4}/S_{17}$ по данным NoRP равно 0.54, и в пересчете на частоты RSTN $S_9/S_{15} = 0.52$.

Что касается GLE в целом, то, как показывает рис. 1, почти все эти события (25 из 28, т.е. 89%) в диапазоне десятков МэВ характеризуются достаточно жестким протонным спектром ($\delta < 1.5$). Для данного рассмотрения особенно важно, что, даже если выделить только GLE-события как наиболее жесткие по спектру протонов, то для них также имеет место корреляция между жесткостью частотного спектра микроволновых всплесков и жесткостью энергетического спектра потока протонов у Земли (рис. 2). Правда, для GLE она не столь существенна, как для всех протонных событий, в частности, потому, что у GLE-событий в силу их жесткости спектральный протонный параметр при энергиях десятки МэВ меняется в гораздо меньшем диапазоне ($\delta \approx 0.4 - 1.9$) по сравнению со всем ансамблем рассматриваемых протонных событий ($\delta \approx 0.4 - 3.25$) (рис. 1). Для GLE коэффициент корреляции между δ и радиопараметром S_9/S_{15} составляет $r \approx 0.41$. При увеличении S_9/S_{15} от 0.25 до 2 параметр δ в среднем возрастает от 0.95 до 1.4. Среди 17 GLE с наиболее жестким радиоспектром $S_9/S_{15} < 0.9$ в 13 случаях (т.е. в 76%) параметр протонного спектра $\delta < 1.2$, а из 8 GLE с относительно мягким радиоспектром ($S_9/S_{15} > 1.25$) в 6 событиях зарегистрирован поток протонов со сравнительно мягким спектром $\delta \geq 1.2$ в диапазоне десятков МэВ.

На рис. 2 выделяются два наземных возрастания с наиболее мягким протонным спектром в диапазоне десятков МэВ. В событии 06.05.1998 (35) при $S_9/S_{15} \approx 1.33$ параметр $\delta \approx 1.89$, а в событии 17.01.2005 (80) при $S_9/S_{15} \approx 1$ параметр $\delta \approx 1.81$. Наземные возрастания интенсивности СКЛ в этих событиях (4% и 3.5% [32]) были одними из самых слабых, что, скорее всего, и определило выпадение этих событий из основной массы GLE. Из рис. 1 ясно, что указанные сочетания параметров S_9/S_{15} и δ хорошо соответствуют средней зависимости между ними для всего ансамбля рассматриваемых событий, но отличаются от более сильных GLE более мягким спектром протонов в диапазоне десятков МэВ.

4. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ f_m И δ

Как и в предшествующих работах [25, 27–29], следующим шагом является анализ соотношения между спектральным протонным индексом δ и частотой спектрального максимума микроволновых всплесков f_m , которая также характеризует энергетический спектр ускоренных во вспышке частиц [31]. Результаты такого анализа для рассматриваемого ансамбля западных протонных событий за 1987–2008 гг. представлены на рис. 3, где GLE-события снова выделены специальными символами. Здесь также имеет место статистическое соответствие между жесткостью (мягкостью) радиоспектра и жесткостью (мягкостью) энергетического спектра потоков протонов у Земли. При увеличении f_m от 3 до 35 ГГц индекс протонного спектра δ уменьшается в среднем примерно от 2.1 до 1.0. Коэффициент корреляции между параметрами f_m и δ составляет $r \approx 0.46$. Основные причины разброса точек, указанные в предыдущем разделе, относятся и к этой диаграмме. Кроме того, для многих событий нет данных на частотах выше 15.4 ГГц, и эта частота указана как нижняя граница частоты спектрального максимума.

Среди 31 события с мягким радиоспектром ($f_m \leq 5$ ГГц) в 21 случае (т.е. в 71%) энергетический спектр протонов также был достаточно мягким ($\delta \geq 2$). В то же время 20 из 30 событий (67%) с жестким радиоспектром ($f_m \geq 15$ ГГц) сопровождались потоками протонов с жестким энергетическим спектром ($\delta < 1.5$). Здесь снова выделяется уже упоминавшееся событие 15.07.2002 (63) с гелиодолготой вспышки W01, в котором при жестком радиоспектре ($f_m \approx 15.4$ ГГц) у Земли наблюдался один из самых мягких протонных спектров с $\delta \approx 2.9$. Причины этого кажущегося несоответствия указаны в предыдущем разделе. Еще одно исключение — небольшое по интенсивности протонное событие 20.02.2002 (60), в котором наблюдалось необычное сочетание жесткого радиоспектра ($f_m \approx 35$ ГГц) с довольно мягким протонным спектром ($\delta \approx 2.34$) — было связано с кратковременной импульсной вспышкой. Такие вспышки, происходящие на небольшой высоте в короне, чаще всего действительно характеризуются жестким радиоспектром, но сопровождаются лишь незначительными потоками протонов у Земли. Без учета этих двух исключительных событий коэффициент корреляции между f_m и δ возрастает до $r \approx 0.53$.

Для отдельно взятых событий с GLE также наблюдается соответствие протонных и радиоспектров. Из 28 событий только в 2 радиоспектр вспышек был мягким ($f_m \leq 5$ ГГц), в 9 жесткость радиоспектра была средней ($f_m \approx 7 - 12$ ГГц), в 17 событиях ($\approx 61\%$) радиоспектр был жестким ($f_m \geq 15$ ГГц). Из 11 событий с мягким или средним

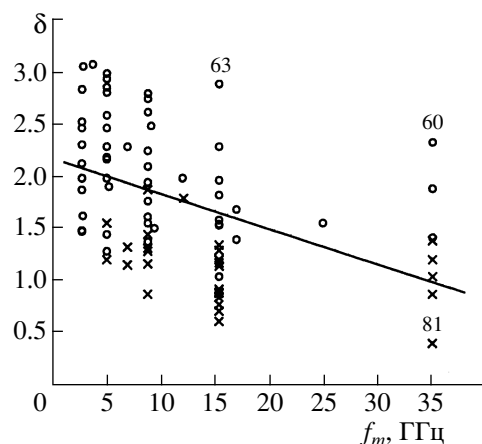


Рис. 3. Корреляция между частотой спектрального максимума микроволновых всплесков f_m и протонным спектральным параметром $\delta = \lg(J_{10}/J_{100})$. Обозначения как на рис. 1. Номера отмечены события: 60 — 20.02.2002, 63 — 15.07.2002, 81 — 20.01.2005.

радиоспектр ($f_m \leq 9 - 12$ ГГц) в 7 случаях спектр протонов в диапазоне десятков МэВ был также сравнительно мягким ($\delta \geq 1.3$). Среди 17 GLE с жестким радиоспектром ($f_m \geq 15$ ГГц) лишь у 2 событий наблюдался сравнительно мягкий протонный спектр ($\delta > 1.3$), а в 9 случаях спектр был наиболее жестким с $\delta < 1.0$. Таким образом, статистическое соответствие характера радиоспектра и протонного спектра проявляется для ансамбля GLE-событий и по параметру f_m .

5. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ S_{17}/S_{35} И δ

Для 31 из 86 рассматриваемых событий имеют радиоданные на частотах ≥ 35 ГГц, в основном, по наблюдениям в обсерватории Нобейма (для события 29 использованы данные Берн). Это позволяет сопоставить индекс протонного спектра δ с отношением пиковых радиопотоков на 17 и 35 ГГц (параметр S_{17}/S_{35}). Результаты представлены на рис. 4. Статистическое соответствие жесткости спектра протонов у Земли и частотного спектра радиовсплесков проявляется и при этом сравнении. В среднем при увеличении радиопараметра S_{17}/S_{35} от 0.25 до 4 индекс протонного спектра δ возрастает от 1.4 до 2.4. Однако в целом эта тенденция выражена слабее, чем аналогичное соответствие между δ и отношением пиковых потоков на частотах 8.8 и 15.4 ГГц (параметр S_9/S_{15} ; см. разд. 3). Коэффициент корреляции между S_{17}/S_{35} и δ составляет $r \approx 0.35$. Значительный разброс точек на рис. 4 обусловлен указанными ранее факторами и сравнительно небольшим числом событий. Возможная дополнительная причина разброса —

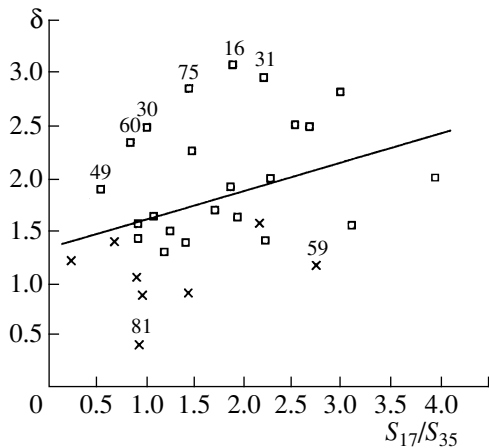


Рис. 4. Корреляция между отношением пиковых потоков вспышечных микроволновых событий на частотах 17 и 35 ГГц (параметр S_{17}/S_{35}) и протонным спектральным параметром $\delta = \lg(J_{10}/J_{100})$. Обозначения как на рис. 1. Номерами отмечены события: 16 – 12.06.1990, 30 – 20.02.1994, 31 – 20.10.1995, 49 – 02.04.2001, 59 – 26.12.2001, 60 – 20.02.2002, 75 – 11.04.2004, 81 – 20.01.2005.

максимум спектра радиоисточников вблизи оснований петель, наиболее тесно связанных с параметрами излучающих электронов, мог располагаться как раз между частотами 17 и 35 ГГц³. Характер зависимости интенсивности радиоизлучения от параметров ускоренных электронов слева и справа от спектрального максимума различен. С другой стороны, излучение на частотах 9 и 15 ГГц радиоисточников в основаниях петель, скорее всего, преимущественно оптически толстое, и поэтому параметр S_9/S_{15} в большинстве случаев косвенно указывает на частоту максимума микроволнового спектра.

Отношение пиковых радиопотоков на 17 и 35 ГГц может быть хорошим индикатором наиболее жестких радиоспектров. При $S_{17}/S_{35} \leq 1$ максимум спектра микроволновых всплесков располагается на $f_m \geq 24$ ГГц. Поэтому не удивительно, что большинству таких событий, как показывает рис. 4, соответствуют потоки протонов с достаточно жестким энергетическим спектром: из 9 событий с $S_{17}/S_{35} < 1$ в 7 случаях $\delta < 1.6$, причем 5 таких событий сопровождалось GLE. Из двух оставшихся событий с $S_{17}/S_{35} < 1$, но относительно мягким протонным спектром, одно – событие 20.02.2002 (60) – уже упоминалось в предыдущем разделе как пример кратковременной импульсной вспышки, сопровождавшейся небольшим потоком протонов у Земли. Протонный спектр другого события

02.04.2001 (49) с $\delta \approx 1.9$ был скорее средним, чем мягким. Некоторое смягчение протонного спектра могло быть обусловлено тем, что это событие произошло на фазе затухания одной из сильнейших геомагнитных бурь с индексом $D_{st} = -387$ нТл 31 марта.

Если частота спектрального максимума ниже 24 ГГц, то $S_{17}/S_{35} \geq 1$ как для более жестких, так и для более мягких спектров. Это может нарушать корреляцию между параметром S_{17}/S_{35} и характером протонных спектров при $S_{17}/S_{35} \geq 1$ даже в тех случаях, когда имеет место соответствие протонного спектра с радиоспектром по другим радиопараметрам. Например, в событии 20.02.1994 (30) $S_{17}/S_{35} = 1$, так как пиковые радиопотоки на обеих частотах были на уровне 100 sfu вследствие вклада теплового тормозного излучения. Однако спектральный максимум располагался на частоте $f_m \approx 2.7$ ГГц, что соответствует наблюдавшемуся мягкому спектру протонов с $\delta \approx 2.48$. Примерно такое же сочетание параметров имело место еще в трех событиях с наиболее мягким протонным спектром на рис. 4: события 12.06.1990 (16), 20.10.1995 (31), 11.04.2004 (75), в которых значение S_{17}/S_{35} было снижено явно вследствие значительного вклада плоского теплового спектра.

Результаты этого и предыдущих разделов показывают, что корреляция между спектром микроволновых всплесков и спектром потоков протонов у Земли лучше проявляется по таким радиопараметрам, как отношение пиковых потоков на 8.8 и 15.4 ГГц и частота спектрального максимума. Отношение же радиопотоков на 17 и 35 ГГц хорошо отражает наиболее жесткие протонные спектры в диапазоне десятков МэВ, в том числе для многих GLE-событий. В следующем разделе будет продемонстрировано, что индикатором появления после солнечных вспышек значительных потоков протонов является не только спектр, но и интенсивность радиовсплесков на частотах 35 ГГц и выше.

6. СОБЫТИЯ С МОЩНЫМИ ВСПЛЕСКАМИ НА 35 ГГц

Известно [18], что западные вспышки с мощными неимпульсными радиовсплесками на высоких частотах, как правило, сопровождаются заметными возрастаниями потока протонов у Земли, а наиболее интенсивные из них достигают уровня GLE. Выше было показано общее соответствие между протонными спектрами в диапазоне десятков МэВ и частотными спектрами радиовсплесков. Можно продемонстрировать эти закономерности по ансамблю микроволновых/миллиметровых всплесков, зарегистрированных в обсерватории Нобеяма с 1990 г., когда появились данные наблюдений на 35 и 80 ГГц.

³ Оценки f_m для 16 наиболее мощных событий, приведенных ниже в таблице, дают значения от 11 до 47 ГГц при средней величине $f_m = 33$ ГГц.

События с мощным радиовсплеском ($S_{35} > 10\,000$ sfu) на частоте 35 ГГц по данным обсерватории Нобейма (верхняя часть таблицы) и протонные возрастания без мощного радиовсплеска (нижняя часть таблицы; см. текст). Для f_m приведены значения, полученные по временным профилям

№	Дата	Время, UT	Вспышка		Радиовсплеск		Протоны J_{100} , pfu	GLE, %
			балл	координаты	S_{35} , sfu	f_m , ГГц		
A1	1990-04-15	02:59	2B/X1.4	N32 E54	19 600	11	<0.1	—
13	1990-05-21	22:15	2B/X5.5	N34 W37	37 800	47	18	24
A2	1991-03-22	22:44	3B/X9.4	S26 E28	142 000	35	55	—
A3	1991-03-29	06:45	3B/X2.4	S28 W60	10 800	30	<0.1	—
A4	1991-05-18	05:13	2N/X2.8	N32 W87	20 300	26	<0.1	—
A5	1991-06-04	03:41	3B/X12	N30 E60	230 000	44	2	—
A6	1991-06-06	01:09	3B/X12.5	N33 E44	245 000	46	4.8	—
A7	1991-06-09	01:39	3B/X10	N34 E04	73 000	36	1.2	—
21	1991-06-11	02:06	3B/X12.5	N32 W15	45 000	30	12	12
A8	1991-10-24	02:38	3B/X2.1	S15 E60	31 500	35	<0.1	—
26	1992-11-02	02:54	2B/X9	S23 W90	41 000	35	70	6.5
49	2001-04-02	21:48	X17.1	N18 W82	24 580	35	4.8	—
A9	2002-07-23	00:31	2B/X4.8	S13 E72	14 500	35	<0.1	—
66	2002-08-24	01:00	1F/X3.1	S02 W81	11 200	18	27	14
81	2005-01-20	06:46	2B/X7.1	N12 W58	87 500	28	680	5400
85	2006-12-13	02:21	4B/X3.4	S06 W24	13 000	40	90	92
B1	1990-05-28	04:30	C1.4	N36 W120	100	1.4	43	6
44	2000-11-08	23:28	1N/M7.8	N10 W75	140	2.8	320	—
B2	2001-04-18	02:15	C2.2	S20 W115	—	—	12	26
B3	2001-08-15	23:50	—	W>120	—	—	27	—
59	2001-12-26	05:06	1B/M7.1	N08 W54	740	6.9	47	13
62	2002-04-21	01:15	1F/X1.5	S14 W84	330	5	20	—

В верхней части таблицы приведены данные о 16 зарегистрированных в 1990–2008 гг. событиях, выделенных по довольно жесткому критерию: максимальный поток радиовсплеска на 35 ГГц $S_{35} > 10\,000$ sfu. Из них 7 событий были в числе рассмотренных выше западных протонных возрастаний; они перечислены в таблице под теми же номерами, что и в “Основной таблице” на сайте. Девяти новым событиям, появившимся в таблице, присвоены номера с буквой “А”. Анализ представленных здесь данных о соответствующих вспышках и сопровождающих потоках протонов показывает следующее. Все события характеризовались жестким радиоспектром, причем в 13 из них спектр был особенно жестким с частотой спектрального максимума $f_m \geq 35$ ГГц. К ним относятся зна-

менитые события июня 1991 г., два крупнейших протонных возрастания последних лет 20.01.2005 (81) и 13.12.2006 (85) и др. Как и следовало ожидать, в четырех случаях (A1, A5, A8, A9) потоки протонов у Земли были существенно ослаблены из-за значительной восточной долготы вспышек ($E > 50^\circ$). Из остальных 12 западных и умеренно восточных событий в 10 поток протонов у Земли в канале $E > 100$ МэВ имел интенсивность J_{100} от 1.2 до 680 pfu, причем в 7 случаях поток протонов был особенно значительным и удовлетворял условию $J_{100} > 10$ pfu, а в 6 случаях имели место GLE. В двух оставшихся случаях (A3, A4), несмотря на мощный микроволновый всплеск, благоприятное расположение вспышек (W60, W90), а также наличие метровых всплесков II и IV типов, потоки про-

тонов у Земли оказались довольно слабыми. Заметим, что длительность микроволнового всплеска в событии АЗ была небольшой, а протонные потоки в связи с импульсными вспышками, как известно, обычно не бывают значительными. Событие А4 — мощная, продолжительная рентгеновская вспышка вблизи западного лимба — вполне могло бы быть протонным по ряду известных признаков. Возможно, в данном случае магнитная связь области события с Землей была неблагоприятной по неясным причинам.

Чтобы судить о том, какие протонные события оказались пропущенными при использовании критерия $S_{35} > 10\,000$ sfu, в нижней части таблицы приведены сведения о 6 дополнительных СКЛ-событиях (под номерами “Основной таблицы” и с добавлением буквы “В”), отобранных наоборот по признакам значительного потока протонов у Земли с $J_{100} \geq 10$ pfu и времени соответствующих всплесков в интервале наблюдений на поляриметрах Нобеема (с 21–22 UT до 07–08 UT). Как видно, 3 события (В1, В2, В3) были связаны со вспышками, произошедшими далеко за западным лимбом, и, следовательно, микроволновые всплески от них не могли регистрироваться на Земле. В 2 из 3 оставшихся событий (59, 62) микроволновые всплески, хоть и не были очень мощными на высоких частотах, но имели большую интенсивность на 9.4 ГГц (4190 и 2480 sfu, соответственно) при мягком частотном спектре. При этом в событии 62 значительная плотность потока радиоизлучения (15 000 sfu) наблюдалась в дециметровом диапазоне на $f \approx 1$ ГГц, что соответствует довольно мягкому энергетическому спектру СКЛ. Известно и несколько других крупных протонных событий за более ранние годы, которым не предшествовали вспышки с мощными радиовсплесками [23].

Обобщая приведенные данные, можно заключить, что большинство всплесков с мощными высокочастотными всплесками ($S_{35} > 10\,000$ sfu) и очень жестким радиоспектром ($f_m \geq 35$ ГГц) сопровождается значительными потоками протонов у Земли с $J_{100} > 1 - 10$ pfu. Существенно, что это правило относится не только к западным, но и к умеренно восточным вспышкам. Последние, когда их потоки на 35 ГГц предельно высоки, также могут приводить к сильным возрастаниям СКЛ. С другой стороны, среди всплесков, не скрытых за лимбом, зарегистрировано лишь несколько протонных событий с $J_{100} > 10$ pfu, которые происходили без мощных и жестких всплесков на 35 ГГц. Это означает, в целом, что мощные высокочастотные микроволновые радиовсплески являются информативным индикатором ускорения значительных потоков протонов во вспышках, происходящих в сильных магнитных полях [6].

Этот вывод получает дальнейшие подтверждения, если для полноты картины обратиться к крупнейшим радиовсплескам и протонным событиям из “Основной таблицы”, связанным со вспышками, для которых нет данных NoRP на 35 ГГц. При этом со стороны высоких частот приходится ограничиваться 15.4 ГГц. Из 14 таких событий с мощными ($S_{15} > 5000$ sfu) и жесткими ($f_m \geq 15.4$ ГГц) радиовсплесками в 11 случаях у Земли наблюдался значительный поток протонов с $J_{100} \geq 1$ pfu, а в 7 случаях он превышал $J_{100} \geq 45$ pfu. С другой стороны, 17 из 19 протонных возрастаний с $J_{100} \geq 1$ pfu наблюдались после мощных микроволновых всплесков ($S_{15} > 5000$ sfu), а в 11 случаях всплески имели еще и довольно жесткий радиоспектр с $f_m \geq 15.4$ ГГц. К этой категории относятся почти все выдающиеся протонные возрастания последних лет, включая события 29.10.2003 (71), 02.11.2003 (72), 04.11.2003 (73), а также не рассматривавшееся восточное событие 07.09.2005. Заметим, что в их число не вошло упоминавшееся известное событие “Дня Бастилии” 14.07.2000 (41), в котором радиовсплеск при мощном потоке ($S_{15} \approx 6100$ sfu) обладал не жестким, а средним спектром с $f_m \approx 8.8$ ГГц. В событии из октябрьской серии 2003 г. 28.10.2003 (70) мощный всплеск был записан с зашкалами на уровнях $S_9 \approx 70\,000$ sfu и $S_{15} \approx 57\,000$ sfu; судя по их продолжительности, на самом деле поток на 15.4 ГГц был выше, чем на 8.8 ГГц, и, следовательно, $f_m > 15.4$ ГГц.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ протонных событий за 1987–2008 гг., отождествляемых со вспышками на западной половине солнечного диска, подтвердил результаты, полученные в [28, 29] при рассмотрении аналогичных событий за 1966–1986 гг. Статистическое соответствие между параметрами частотного спектра микроволновых всплесков на Солнце и энергетического спектра потоков протонов у Земли в диапазоне десятков МэВ подтверждается по событиям уже 4 циклов. Установлена корреляция между отношением пиковых радиопотоков на частотах 9 и 15 ГГц (S_9/S_{15}) и частотой спектрального максимума микроволновых всплесков f_m , с одной стороны, и протонным спектральным параметром $\lg(J_{10}/J_{100})$ — с другой. Протонный индекс измеряется по отношению пиковых величин потока протонов в каналах $E > 10$ МэВ и $E > 100$ МэВ (J_{10} и J_{100} , соответственно) и эквивалентен степенному индексу δ интегрального энергетического спектра $J_E \propto E^{-\delta}$. Вспышки с мягким радиоспектром ($S_9/S_{15} \geq 1.5$, $f_m \leq 5$ ГГц) сопровождаются потоками протонов с мягким (крутым) энергетическим спектром ($\delta \geq 1.5 - 2$), а вспышкам с жестким микроволновым

излучением ($S_9/S_{15} \leq 1$, $f_m \geq 15$ ГГц) соответствуют потоки протонов с жестким (пологим) энергетическим спектром ($\delta \leq 1.5$).

Еще один доступный радиопараметр S_{17}/S_{35} (отношение пиковых потоков всплесков на частотах 17 и 35 ГГц) также обнаруживает статистическую связь с индексом δ протонного спектра у Земли. Однако для S_{17}/S_{35} корреляция с энергетическим спектром протонов выражена слабее, чем для параметров S_9/S_{15} и f_m . Это, по-видимому, обусловлено тем, что частоты 17 и 35 ГГц нередко располагаются по разные стороны спектрального максимума, что усложняет взаимосвязь отношения S_{17}/S_{35} с параметрами излучающих электронов. Кроме того, параметр S_{17}/S_{35} не несет информации о частоте спектрального максимума f_m , когда $S_{17}/S_{35} > 1$ ($f_m < 5 - 10$ ГГц). Вместе с тем, наличие высокочастотных микроволновых всплесков, в которых предельно жесткий частотный спектр ($S_{17}/S_{35} < 1$, $f_m \geq 35$ ГГц) сочетается со значительным радиопотоком ($S_{35} \geq 10000$ sfu), типично для большинства крупных протонных событий ($J_{100} > 1 - 10$ pfu) с жестким энергетическим спектром и позволяет, в частности, выделить экстремальные протонные события последнего цикла. Причина этого состоит в том, что радиовсплески с такими характеристиками указывают на ускорение большого количества частиц во вспышках, происходящих в сильных магнитных полях [6].

Результаты данной работы означают, что частотный спектр микроволновых всплесков, зависящий, в частности, от энергетического спектра излучающих электронов, ускоренных во вспышке, отражает и энергетический спектр протонов, регистрируемых у Земли в виде СКЛ. Существенно, что информация о спектре ускоренных во вспышке частиц сохраняется даже в диапазоне десятков МэВ, несмотря на сложные условия выхода и распространения протонов и многие другие факторы. Корреляция вспышечных радиоспектров и энергетических спектров потоков протонов выходит за рамки упоминавшегося “синдрома большой вспышки” [26]. Это является важным аргументом в пользу того, что ускорение протонов, приходящих к Земле (во всяком случае, их первого импульса), в подавляющем большинстве событий происходит непосредственно во вспышке, а не в ударной волне, связанной с КВМ [6]. Возможно, что в тех единичных событиях, в которых значительные потоки протонов наблюдались при слабых радиовсплесках, например, 09.11.2000 (44), мы, действительно, имеем дело с ускорением протонов ударными волнами. Не исключено, что это же справедливо и для событий 30.09.1998 (37), 12.09.2000 (43). В немногих оставшихся событиях со слабыми радиовсплесками потоки протонов были также слабы, а

кажущееся несоответствие между мягкими спектрами протонов и жесткими, на первый взгляд, радиоспектрами полностью объясняется значительным вкладом в такие радиовсплески теплового тормозного излучения, имеющего плоский спектр.

Вспышечное ускорение электронов и протонов до высоких энергий может осуществляться как в ходе первичного импульсного энерговыделения, так и на постэруптивной фазе (см., например, [34]). В одной из современных концепций [35, 36] предполагается, что ускорение частиц проходит две стадии. Сначала электроны и протоны ускоряются в области магнитного пересоединения в высокотемпературном, турбулентном токовом слое. Дальнейшее ускорение происходит в процессе схлопывания (коллапса) петлеобразных магнитных ловушек.

Проведенный анализ существенно уточняет результаты, полученные в [5]. В этой работе сделано два важных вывода. Во-первых, узкое гауссово распределение числа вспышек по величине все того же спектрального протонного параметра δ с выраженным максимумом при $\delta \approx 1.5$ свидетельствует о существовании выделенного спектра ускоренных частиц в мощных вспышках. Во-вторых, отношение J_{10}/J_{100} возрастает примерно на порядок (т.е., протонный спектр смягчается) при переходе от импульсных вспышек умеренной длительности к событиям с продолжительным мягким рентгеновским излучением постэруптивных петель. В настоящей работе нами показано, что спектр ускоренных частиц во вспышке меняется в довольно широких пределах в зависимости от условий (в частности, магнитного поля) в месте ускорения, что отражается как в частотном спектре микроволновых всплесков, так и в энергетическом спектре соответствующих потоков протонов у Земли. Существенно, что это относится не только ко вспышкам с мягким спектром (с длительным постэруптивным энерговыделением), как продемонстрировано в [5], но и ко вспышкам с жестким спектром (с преобладающим ускорением в импульсной фазе на небольших высотах в сильных магнитных полях над пятнами), в том числе и к GLE-событиям.

В данной работе связь между вспышечными спектрами и спектрами СКЛ продемонстрирована опосредованно — через частотный спектр микроволновых всплесков, генерируемых субрелятивистскими электронами. Однако в редких самых мощных событиях об энергетическом спектре протонов, ускоренных во вспышке до энергий >300 МэВ, можно судить напрямую по спектру высокоэнергичного пионного гамма-излучения с характерным максимумом при энергии фотонов 70–100 МэВ. В [37] представлены свидетельства того, что энергетический спектр протонов СКЛ, восстановленный по наземному возрастанию, оказывается близким к спектру вспышечных

протонов, определенному по наблюдаемому гамма-излучению. Это подкрепляет вывод настоящей работы о существенном вкладе вспышечного ускорения частиц в формирование спектра СКЛ.

В последнее время появляется все больше данных, показывающих, что многие СКЛ-события следует рассматривать как смешанные, поскольку в них обнаруживаются признаки как вспышечного ускорения частиц, так и ускорения на ударной волне перед КВМ [12–15]. Представленные здесь результаты о корреляции между спектром вспышечных излучений и энергетическим спектром потоков протонов у Земли свидетельствуют о том, что характеристики начального импульса СКЛ в значительной мере определяются ускорением частиц непосредственно во вспышке.

Авторы благодарны коллективам, осуществляющим издание “Solar-Geophysical Data”, наблюдения солнечного радиоизлучения на инструментах сети RSTN и на поляриметрах обсерватории Нобеяма, а также измерения потоков протонов на ИСЗ GOES, за данные, использованные при анализе. Авторы признательны А.В. Белову и В.Г. Курту за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 07-02-00101, 09-02-00115, 08-02-92204, 09-02-00226) и Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ 4573.2008.2), а также программ фундаментальных исследований РАН “Плазменные процессы в солнечной системе” и “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. А. Базилевская, А. И. Сладкова, В. В. Фомичев, И. М. Черток, *Астрон. журн.* **67**, 409 (1990).
2. I. M. Chertok, in: *Proceedings of the 24th International Cosmic Ray Conference*, August 28–September 8, 1995, Roma, Italy, v. 4 (Intern. Union Pure and Appl. Phys., 1995), p. 78.
3. K.-L. Klein and G. Trotter, *Space Sci. Rev.* **95**, 215 (2001).
4. М. А. Лившиц, А. В. Белов, *Астрон. журн.* **81**, 732 (2004).
5. А. Р. Осокин, М. А. Лившиц, А. В. Белов, *Астрон. журн.* **84**, 642 (2007).
6. V. V. Grechnev, V. G. Kurt, I. M. Chertok, *et al.*, *Solar Phys.* **252**, 149 (2008).
7. L. I. Miroshnichenko and J. A. Perez-Peraza, *Intern. J. Mod. Phys. A* **23**, 1 (2008).
8. D. V. Reames, *Space Sci. Rev.* **90**, 413 (1999).
9. S. W. Kahler, in: *Space Weather*, ed. P. Song, H. J. Singer, G. L. Siscoe, AGU Geophys. Monogr. **125**, 109 (2001).
10. E. W. Cliver, S. W. Kahler, and D. V. Reames, *Astrophys. J.* **605**, 902 (2004).
11. A. J. Tylka and M. A. Lee, *Astrophys. J.* **646**, 1319 (2006).
12. M.-B. Kallenrode, *J. Phys. G.* **29**, 965 (2003).
13. H. V. Cane and D. Lario, *Space Sci. Rev.* **123**, 45 (2006).
14. G. A. Bazilevskaya, *Adv. Space Res.* **43**, 350 (2009).
15. E. W. Cliver and A. G. Ling, *Astrophys. J.* **690**, 598 (2009).
16. K. G. McCracken, H. Moraal, and P. H. Stoker, *J. Geophys. Res.* **113**, A12101, doi:10.1029/2007JA012829 (2008).
17. S. N. Kuznetsov, V. G. Kurt, B. Yu. Yushkov, *et al.*, in: *Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference*, August 3–10, 2005, Pune, India, v. 1 (Intern. Union Pure and Appl. Phys., 2005), p. 49.
18. D. L. Croom, *Solar Phys.* **19**, 152 (1971).
19. J. P. Castelli and W. R. Barron, *J. Geophys. Res.* **82**, 1275 (1977).
20. С. Т. Акиньян, В. В. Фомичев, И. М. Черток, *Геомагн. и аэрон.* **20**, 385 (1980).
21. E. W. Cliver, S. W. Kahler, H. V. Cane, *et al.*, *Solar Phys.* **89**, 181 (1983).
22. A. Belov, H. Garsia, V. Kurt, *et al.*, *Solar Phys.* **229**, 135 (2005).
23. E. W. Cliver, *Astrophys. J.* **639**, 1206 (2006).
24. В. В. Фомичев, И. М. Черток, *Астрон. журн.* **62**, 956 (1985).
25. I. M. Chertok, *Astron. Nachr.* **311**, 379 (1990).
26. S. W. Kahler, *J. Geophys. Res.* **87**, 3439 (1982).
27. P. Bakshi and W. Barron, *J. Geophys. Res.* **84**, 131 (1979).
28. И. М. Черток, *Геомагн. и аэрон.* **22**, 182 (1982).
29. И. М. Черток, *Солнечные данные* **11**, 85 (1989).
30. A. I. Sladkova, G. A. Bazilevskaya, V. A. Ishkov, *et al.*, *Catalogue of Solar Proton Events 1987–1996*, ed. Yu. I. Logachev (Moscow Univ. Press, 1998), 246 pp.
31. G. A. Dulk and K. A. Marsh, *Astrophys. J.* **259**, 350 (1982).
32. А. В. Белов, Е. А. Ерошенко, О. Н. Крякунова и др. *Геомагн. и аэрон.* (2009, в печати).
33. M. J. Aschwanden and D. Alexander, *Solar Phys.* **204**, 93 (2001).
34. V. V. Akimov, P. Ambrož, A. V. Belov, *et al.*, *Solar Phys.* **166**, 107 (1996).
35. А. В. Орешина, Б. В. Сомов, *Письма в “Астрон. журн.”* **35**, 221 (2009).
36. С. А. Богачев, Б. В. Сомов, *Письма в “Астрон. журн.”*, **35**, 63 (2009).
37. В. Г. Курт, Б. Ю. Юшков, А. В. Белов, <http://solarwind.cosmos.ru/txt/2009/presentations/The%20Sun/Kurt.ppt> (доклад на конф. “Физика плазмы в солнечной системе”. ИКИ, 16–20 февраля 2009 г.).