

Зависимость между энергетическим спектром протонов и частотой
спектрального максимума солнечных микроволновых всплесков

И.М.Черток

Dependence between Energy Spectrum of Protons and
Maximum Spectral Frequency of Solar Microwave Bursts

I.M.Chertok

Abstract

It is shown by data for 1966-1986 that a specific dependence takes place between the power index γ of the proton energy spectrum in the range of tens of MeV near the Earth and the frequency f at which the flux density of centimetre bursts has the maximum. Flares with the relatively soft radio spectrum ($f_m \lesssim 7$ GHz) are accompanied by proton fluxes with the soft energy spectrum ($\gamma \sim 1.5-3.5$). Events with a hard radio spectrum ($f_m \gtrsim 9$ GHz) correspond to proton fluxes with the hard energy spectrum ($\gamma \sim 1-2$). This relationship of the spectra agrees qualitatively with the model of the formation of the proton spectrum in coronal magnetic traps in a process of the interaction with the small-scale turbulence. Based on the discovered dependence the heliolongitude function describing the softening of the proton spectrum from east flares is determined. It is demonstrated that the parameter f_m may be used for the short-term prediction of the proton spectral index by radio data.

Потоки протонов, наблюдаемые в межпланетном пространстве после мощных солнечных вспышек, в диапазоне энергий десятки МэВ обычно характеризуются степенным энергетическим спектром $J(>E) \propto E^{-\gamma}$ с показателем $\gamma \sim 1-4$. С другой стороны, ускорение электронов на импульсной фазе вспышек сопровождается генерацией разнообразного электромагнитного излучения, например, микроволновых всплесков с частотным спектром, имеющим, как правило, максимум интенсивности на частотах $f_M \sim 3-15$ ГГц.

Настоящая работа посвящена анализу связи между параметрами частотного спектра радиовсплесков и энергетического спектра протонов, в частности, между частотой спектрального максимума f_M и показателем γ . Этот вопрос представляется важным для понимания процессов ускорения электронов и протонов во вспышке, механизма генерации микроволновых всплесков, динамики частиц в корональных магнитных ловушках и их выхода в межпланетное пространство. Он также является критическим для концепции "синдрома большой вспышки" [1], согласно которой наблюдаемая зависимость между интенсивностью потоков протонов в межпланетном пространстве и вспышечными радиовсплесками не означает какой-либо физической связи между ускорением протонов и электронов, а объясняется простой корреляцией, которая может существовать между любыми, даже независимыми с физической точки зрения

параметрами, отражающими энергетику вспышки. Соотношение между энергетическими и радио спектрами имеет большое значение и для решения вопроса о том, принадлежат ли протоны, которые ускоряются на импульсной фазе и дают гамма-линии, и потоки протонов, наблюдаемые в межпланетном пространстве, единому ансамблю частиц или представляют собой разные популяции (см. [1-3]). Обсуждаемая проблема имеет также прикладной аспект. Если связь между спектрами протонов и радиовсплесков существует и установлена для событий определенного класса, то ее можно использовать для заблаговременных оценок показателя спектра протонов у Земли в рамках количественной диагностики протонных вспышек по радиовсплескам [3].

Некоторые указания на наличие связи между частотой спектрального максимума f_M и показателем спектра протонов γ были получены в [4,5] при анализе сравнительно небольшого числа вспышек. Однако затем в [1] при обосновании концепции "синдрома большой вспышки" утверждалось, что такая связь не имеет места.

Ниже излагаются результаты анализа, основанного на данных о большом ансамбле солнечных протонных событий за 1966-1986 гг. Использована информация о потоках протонов и радиовсплесках, содержащаяся в каталогах [6,7], а также в [8,9]. Рассматриваются возмущения потока протонов, которые надежно отождествляются с конкретными вспышками на диске и характеризуются интенсивностью у Земли $J(E > 10 \text{ МэВ}) \approx 5 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. Такое ограничение на поток протонов позволяет использовать наиболее точные данные о показателе спектра γ и одновременно дает возможность автоматически исключить из анализа события, связанные с импульсными вспышками. Последние, как известно, обладают специфическими характеристиками и, как правило, не сопровождаются интенсивными потоками протонов в межпланетном пространстве [2,3]. Что касается частоты спектрального максимума f_M , то она определялась на основе частотного спектра, который строился по совокупности данных мировой сети обсерваторий об интенсивности радиовсплесков на многих фиксированных частотах [8,9].

Для того чтобы при определении зависимости γ от f_M исключить влияние на показатель спектра протонов гелиодолготы вспышки, следует ограничиться протонными событиями, связанными со вспышками в пределах оптимального долготного интервала (ОДИ), т.е. $20-80^\circ \text{ W}$. Результаты сопоставления γ и f_M для 41 события в ОДИ представлены на рис.1. Видно, что несмотря на определенный разброс между частотой спектрального максимума f_M и показателем спектра γ имеет место очевидная зависимость. После вспышек с относительно жестким радиоспектром, когда $f_M \approx 9 \text{ ГГц}$, регистрируются потоки протонов с жестким энергетическим спектром, у которых показатель в основном заключен в пределах $\gamma \sim 1-2$. При этом повышение f_M вплоть до 70 ГГц , по-видимому, не сопровождается какими-либо значимыми изменениями γ . С другой стороны, в событиях с мягким радиоспектром при уменьшении f_M от 7 до 3 ГГц показатель γ возрастает от

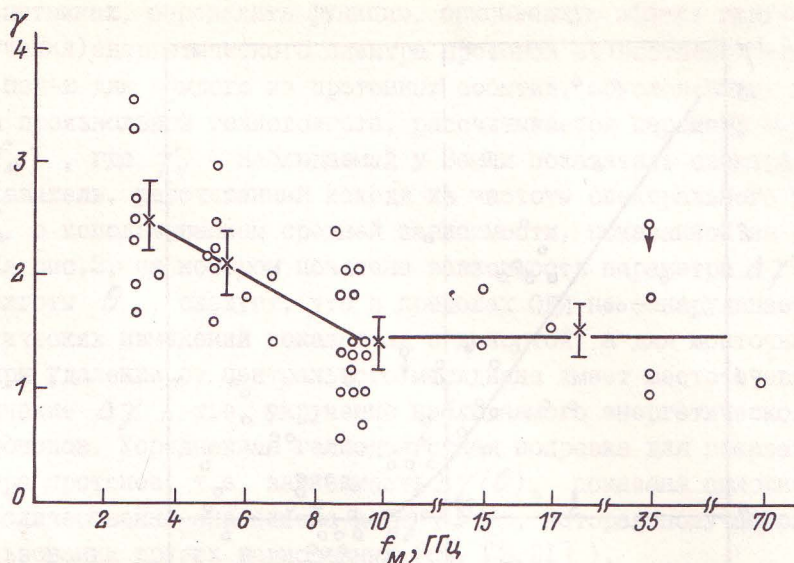


Рис. I

1.5–2.5 до 2.0–3.5, т.е. энергетический спектр протонов становится все более мягким.

Из рис. I следует также, что почти все (15 из 16) потоки протонов с наиболее жестким энергетическим спектром $\gamma < 1.5$ наблюдались после вспышек, имеющих жесткий радиоспектр, т.е. $f_M \geq 9$ ГГц. Среди событий с наиболее мягким энергетическим спектром протонов $\gamma \geq 2$, напротив, явно доминируют (75%) вспышки с мягким радиоспектром $f_M \leq 7$ ГГц. Зависимость от f_M средних величин γ , которые обозначены крестиками, описывается кусочно-линейной функцией, показанной сплошной линией.

Обнаруженная зависимость между f_M и γ свидетельствует о том, что энергетические спектры протонов и электронов, ускоренных во вспышке, тесно связаны между собой. Наблюдаемый энергетический спектр протонов в значительной мере определяется физическими условиями в области вспышки и для событий в ОДИ не искажается сильно в процессе выхода и распространения частиц в межпланетном пространстве.

Соответствие между мягким (жестким) радиоспектром и мягким (жестким) спектром протонов качественно согласуется с рассмотренной в [10] моделью формирования спектра протонов в процессе взаимодействия с мелкомасштабной альвеновской турбулентностью в корональных магнитных ловушках. Согласно этой модели, энергетический спектр определяется режимом пичч-угловой диффузии протонов, который в свою очередь весьма чувствителен к концентрации горячей плазмы в петле-образной ловушке n . При этом низкой концентрации соответствует режим умеренной диффузии и относительно мягкий спектр протонов, а более высокой концентрации – режим слабой диффузии и жесткий спектр

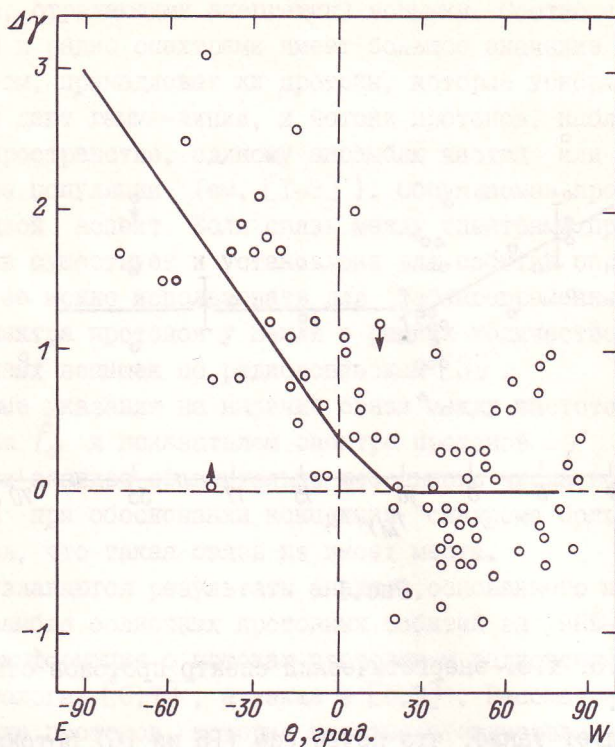


Рис. 2

протонов. В рамках плазменного механизма генерации микроволновых всплесков частота спектрального максимума $f_M \propto \sqrt{n}$. Следовательно, удержание частиц в высоких корональных петлях с относительно низкой концентрацией $n \sim (1-5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ должно сопровождаться мягким радиоспектром микроволновых всплесков и мягким энергетическим спектром протонов. Когда же частицы оказываются захваченными в низких петлях с $n \sim 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, формируется жесткий спектр протонов и одновременно генерируется микроволновый всплеск с жестким радиоспектром.

Аналогичное сочетание энергетического и радио спектров может иметь место и при гиротронном механизме микроволновых всплесков. В этом случае, однако, мягкость или жесткость радиоспектра задается наряду со спектром ускоренных частиц различной напряженностью магнитного поля соответственно в высоких и низких корональных петлях. Не исключено, что вспышки с мягким спектром протонов и радиовсплесков в основном являются внепятенными. Возможен также комбинированный вариант, когда в высоких корональных петлях основным механизмом генерации микроволновых всплесков с мягким радиоспектром является плазменный, а в низколежащих петлях с сильным магнитным полем доминирует гиротронный механизм.

Наличие систематической зависимости между f_M и γ для событий в ОДИ позволяет, опираясь только на данные наблюдений на околозем-

ных спутниках, определить функцию, описывающую эффект укручения (смягчения) энергетического спектра протонов от восточных вспышек. С этой целью для каждого из протонных событий, обусловленных вспышками на произвольной гелиодолготе, рассчитывается параметр $\Delta\gamma = \gamma_H - \gamma(f_M)$, где γ_H - наблюдаемый у Земли показатель спектра, а $\gamma(f_M)$ - показатель, рассчитанный исходя из частоты спектрального максимума f_M с использованием средней зависимости, показанной на рис.1.

Из рис.2, на котором показана зависимость параметра $\Delta\gamma$ от гелиодолготы θ , следует, что в пределах ОДИ не обнаруживается систематических изменений показателя с долготой, а для восточных вспышек при удалении от центрального меридиана имеет место очевидное увеличение $\Delta\gamma$, т.е. укручение наблюдаемого энергетического спектра протонов. Усредненная гелиодолготная поправка для показателя спектра протонов, т.е. зависимость $\Delta\gamma(\theta)$, показана сплошной линией. Количественно она близка к $\Delta\gamma(\theta)$, которая получается при использовании других радиоданных (см. [3, II]).

Установленные выше зависимость $\gamma(f_M)$ и гелиодолготная поправка $\Delta\gamma(\theta)$ позволяют по наблюдаемому радиоизлучению заблаговременно оценивать показатель спектра протонов у Земли, используя выражение $\gamma = \gamma(f_M) + \Delta\gamma(\theta)$. Это может быть сделано, в частности, для вспышек, удовлетворяющих критерию протонности (см. [3]). Для иллюстрации такие оценки проведены для рассматриваемого здесь ансамбля событий. Как показывает анализ, оценки показателя γ по частоте спектрального максимума f_M с учетом долготы вспышки θ дают удовлетворительные результаты. Коэффициент корреляции между расчетной (γ_p) и наблюдаемой (γ_H) величинами показателя спектра $r \sim 0.73 \pm 0.05$. Без учета трех событий с наибольшим расхождением между γ_p и γ_H , которые на рис.2 указаны под номерами 1 (16 мая 1981 г.), 2 (3 ноября 1983 г.) и 3 (25 апреля 1984 г.) коэффициент корреляции достигает $r \sim 0.79 \pm 0.04$. При этом события № 1, 2 характеризуются исключительно мягким энергетическим спектром протонов $\gamma_H \sim 4.4$ и 3.5. В событии № 3 из-за зашкала интенсивности на высоких частотах определена лишь нижняя граница параметра f_M , а наблюдаемый спектр протонов необычно жесткий ($\gamma \sim 2.6$) для вспышек в середине восточной половины диска. Подсчеты показывают также, что в 65-75% случаев абсолютная разность между показателями $|\gamma_H - \gamma_p| \lesssim 0.5$ или относительное различие показателей спектра протонов $|\gamma_H - \gamma_p|/\gamma_H \lesssim 0.025$.

Проведенный анализ позволяет заключить, что связь между потоками протонов от солнечных вспышек и радиовсплесками не сводится к "синдрому большой вспышки", а отражает более глубокие физические закономерности. Определенная зависимость имеет место не только между чисто количественными параметрами двух явлений, в частности, между интенсивностью протонов и радиовсплесков. Тесно связанными оказываются и такие качественные характеристики, как частотный спектр микроволновых всплесков и энергетический спектр протонов, например, частота спектрального максимума f_M и показатель спектра γ . Такое

соответствие спектров обнаруживается и при использовании вместо f_M ряда других параметров частотного спектра (см. [3, II]).

Потоки протонов от вспышек с мягким радиоспектром характеризуются не только мягким энергетическим спектром. Как показывает анализ [12], они обладают и некоторыми дополнительными специфическими свойствами, в частности, избыточной интенсивностью в области низких энергий и большой временной задержкой максимума потока относительно соответствующей вспышки. Это делает также события интересным и важным объектом дальнейших исследований.

Литература

1. Kahler S.W./ J.Geophys.Res. 1982. Vol.87.N 5. P.3439-3448.
2. Кочаров Г.Е./ Итоги науки и техн. ВИНТИ.Астрон. 1987. Вып.32. С.43-141.
3. Черток И.М./ В сб.: Прогнозирование ионосферных, магнито - сферных возмущений и солнечной активности. М.: Наука. 1987. Т.18. № 3. С.39-59.
4. Акиньян и др./ Геомагнетизм и аэрон.1978.Т.18.№ 3.С.410-414.
5. Bakshi P., Barron W./ J.Geophys.Res. 1979. Vol.84.N 1. P.131-137.
6. Catalog of Solar Particle Events 1955-1969. Ed.by Z.Svestka and P.Simon / Dordrecht-Boston: D.Reidel Publ.Co. 1975.
7. Каталог энергетических спектров солнечных протонных событий. Под ред. Ю.И.Логачева/ М.:ИЗМИРАН, 1986.
8. Солн.данные/ 1966-1986.
9. Solar-Geophysical Data/ Boulder. 1966-1986.
10. Bepalov P.A., Zaitsev V.V./ In: Solar Maximum Analysis. Utrecht: VNU Science Press.1986. P.247-254.
11. Черток И.М./ Геомагнетизм и аэрон. 1982.Т.22.№ 2.С.182-186.
12. Черток И.М. Базилевская Г.А., Сладкова А.И./ Геомагнетизм и аэрон. 1987.Т.27.№ 3. С.362-369.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн АН СССР

Поступила в редакцию
10 марта 1989 г.