

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНЫХ ЭРУПТИВНЫХ СОБЫТИЙ И ОКОЛОЗЕМНЫХ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В.В. Гречнев, В.И. Киселев, Н.С. Мешалкина

RELATIONS BETWEEN PARAMETERS OF SOLAR ERUPTIVE EVENTS AND HIGH-ENERGY NEAR-EARTH PROTON ENHANCEMENTS

V.V. Grechnev, V.I. Kiselev, N.S. Meshalkina

В продолжение исследования, опубликованного в статье Grechnev et al. (PASJ, 65, SP1, S4, 2013), проанализированы соотношения между различными комбинациями пиковых потоков и флюенсов микроволновых всплесков, записанных радиополяриметрами Нобеяма на частоте 35 ГГц в 1990–2015 гг., и соответствующих околоземных протонных возрастаний с энергиями выше 100 МэВ. Группировки событий по длительности, ожидаемой при существовании двух разных категорий «импульсных» и «постепенных» событий, не обнаружено. Корреляция между флюенсами выше, чем между пиковыми потоками, что, скорее всего, отражает зависимость полного числа протонов от общей продолжительности работы процесса их ускорения. Выявлена прямая зависимость вероятности протонного возрастания от пикового потока всплеска на 35 ГГц и от его длительности.

In elaboration of a study by Grechnev et al. (2013, PASJ 65, SP1, S4), we analyze the relations between various combinations of peak fluxes and fluences of microwave bursts at 35 GHz recorded with the Nobeyama Radio Polarimeters during 1990–2015, on the one hand, and corresponding near-Earth proton enhancements with $E > 100$ MeV, on the other hand. Clustering the events according to their durations, expected for the existence of two different categories of “impulsive” and “gradual” events, was not revealed. A correlation was found to be higher between the microwave and proton fluences than between their peak fluxes. Most likely, this fact reflects the dependence of the total number of protons on the whole duration of the acceleration process. A direct dependence was found for the probability of a proton enhancement on the peak flux of the 35 GHz burst and its duration.

Введение

За ускорение частиц могут быть ответственны вспышечные процессы в активной области или ударные волны в более обширном пространстве [Cliver et al., 1989; Kallenrode, 2003; Aschwanden, 2012; Reames, 2013]. Эти две возможные области ускорения считаются удаленными и фактически независимыми друг от друга. Однако исследования последних лет показали, что связь между солнечными вспышками, эрупциями, ударными волнами и корональными выбросами массы (КВМ) более тесная, чем предполагалось ранее [Zhang et al., 2001; Temmer et al., 2008; Grechnev et al., 2013, 2015]. Для выяснения вклада двух возможных источников ускорения анализируются соотношения между параметрами вспышек и околоземных протонных возрастаний высоких энергий. Основная цель работы – выяснить, корреляция между какими параметрами солнечных эруптивных событий и околоземных протонных возрастаний наиболее высока.

Вероятность протонного возрастания и мощность всплеска на 35 ГГц

Распределение вероятности протонного возрастания ($P_{E_p > 100 \text{ МэВ}}$) в зависимости от пикового потока микроволнового всплеска на 35 ГГц (F_{35}) приведено на рис. 1. При максимуме всплеска $F_{35} \approx 10^3$ с.е.п. $P_{E_p > 100 \text{ МэВ}}$ составляет около 35 %. С ростом F_{35} повышается и $P_{E_p > 100 \text{ МэВ}}$, приближаясь к 100 % при $F_{35} \geq 10^5$ с.е.п. Вероятность протонного возрастания при западном расположении его солнечного источника на 10–20 % выше усредненной по всему набору событий.

Роль длительности всплеска

Для выяснения причин известной пониженной протонной продуктивности импульсных событий

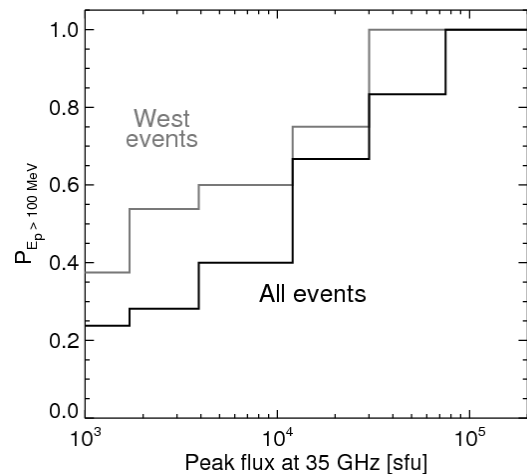


Рис. 1. Вероятность протонного возрастания $P_{E_p > 100 \text{ МэВ}}$ от F_{35} .

рассмотрено распределение микроволновых всплесков $\geq 10^3$ с.е.п. по их длительности. Из-за относительно небольшого числа событий гистограммы их распределений по длительности не показательны, и для анализа использованы интегральные распределения вероятности. Такое распределение характеризует вероятность события, если его длительность t_{35} не превышает заданной величины. Вид интегрального распределения вероятности по длительности для микроволновых всплесков, вызвавших протонные возрастания $P_p(t_{35})$, близок к функции ошибок $\text{erf}(t/\tau)$. Следовательно, распределение близко к нормальному, и плотность распределения вероятности имеет вид центрированной на ноль гауссианы $\frac{2}{\tau\sqrt{\pi}} e^{-(t/\tau)^2}$. Характер распределения по длительности микроволновых всплесков без протонных возрастаний $P_n(t_{35})$ оказался таким же. Минимизацией

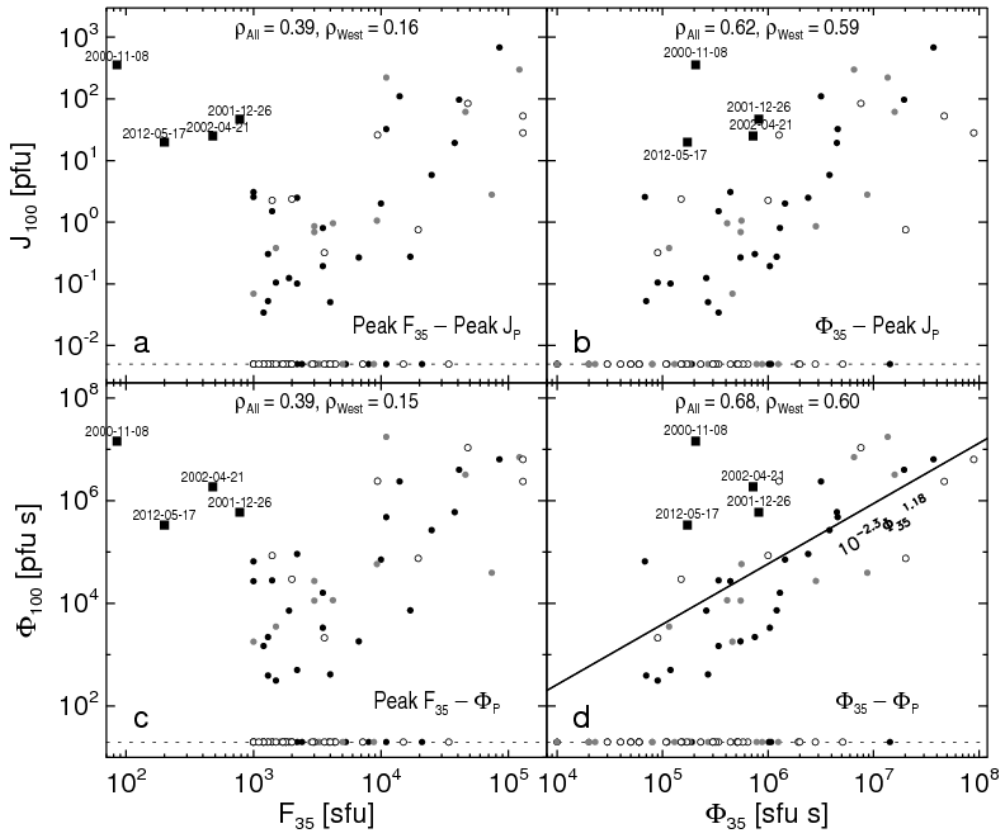


Рис. 2. Соотношения между разными комбинациями пиковых величин J_{100} и F_{35} и флюенсов Φ_p и Φ_{35} . Сплошная наклонная линия (d) – линейная аппроксимация распределения в логарифмическом масштабе.

отклонений между фактическим распределением вероятности и его аналитической аппроксимацией получены оценки характерных длительностей микроволновых всплесков для протонных событий $\tau_p=17.5$ мин и для непотонных событий $\tau_n=10.4$ мин. При найденной аппроксимации вероятность протонного возрастания в зависимости от t_{35} можно оценить как

$$P_p(t_{35}) = 1 / (P_p / P_n + 1) = \left[\tau_p / \tau_n \exp\left\{ t_{35}^2 (1/\tau_p^2 - 1/\tau_n^2) \right\} + 1 \right]^{-1}.$$

Идентичность функций распределения для событий с протонными возрастаниями и без них указывает на отсутствие принципиальных различий между этими классами событий.

Микроволновые и протонные флюенсы

Ранее нами исследовались соотношения между пиковыми значениями микроволновых всплесков и протонных возрастаний. Возможно, что корреляция более высока для флюенсов – интегралов от потоков по времени. Соотношения между различными комбинациями пиковых значений и микроволновых (Φ_{35}) и протонных (Φ_{100}) флюенсов с долготной коррекцией [Belov, 2009] представлены на рис. 2. Коэффициенты корреляции для всех событий и отдельно для западных указаны в верхней части графиков. Наибольший коэффициент корреляции 0.68 наблюдается между протонными и микроволновыми флюенсами: для всей совокупности событий с $F_{35} \geq 10^3$ с.е.п. (без учета 4-х обильных событий) ко-

эффициент корреляции между флюенсами составляет 0.81, а для остальных комбинаций не превышает 0.75. Уравнение линейной регрессии для логарифмов Φ_{100} и Φ_{35} , включая 4 обильных события, имеет вид $\Phi_{100} = 10^{-2.28} \Phi_{35}^{1.18}$. Без учета этих 4-х событий показатель степени несколько выше единицы, $\Phi_{100} = 10^{-3.54} \Phi_{35}^{1.35}$. Прямая связь протонного флюенса с микроволновым означает зависимость полного числа околоземных протонов высоких энергий от общей продолжительности действия процесса их ускорения.

Соотношения между параметрами солнечной эруптивной активности и флюенсами протонных возрастаний

В работе [Trottet et al., 2015] проанализированы соотношения между пиковым потоком протонов (J_p) в диапазоне 15–40 МэВ и пиковым потоком мягкого рентгеновского излучения (I_{SXR}), его флюенсом от начала до пика (Φ_{SXR}), микроволновым флюенсом и скоростью КВМ (V_{CME}) для 44 околоземных протонных возрастаний. Флюенс Φ_{35} коррелирует с флюенсом Φ_{100} существенно лучше, чем с J_p , поэтому мы анализируем корреляции с Φ_{100} . На рис. 3 приведены логарифмические графики рассеяния Φ_{100} в зависимости от каждого из этих параметров. Более высокая корреляция Φ_{100} с Φ_{SXR} , чем с J_{SXR} подтверждает, что существенна не только интенсивность ускорительного процесса, но и его длительность. Судя по рис. 3, а, к нетипично обильным относится и событие 4 ноября 1997 г. ($F_{35} = 10^3$ сеп, $t_{35} = 3$ мин.,

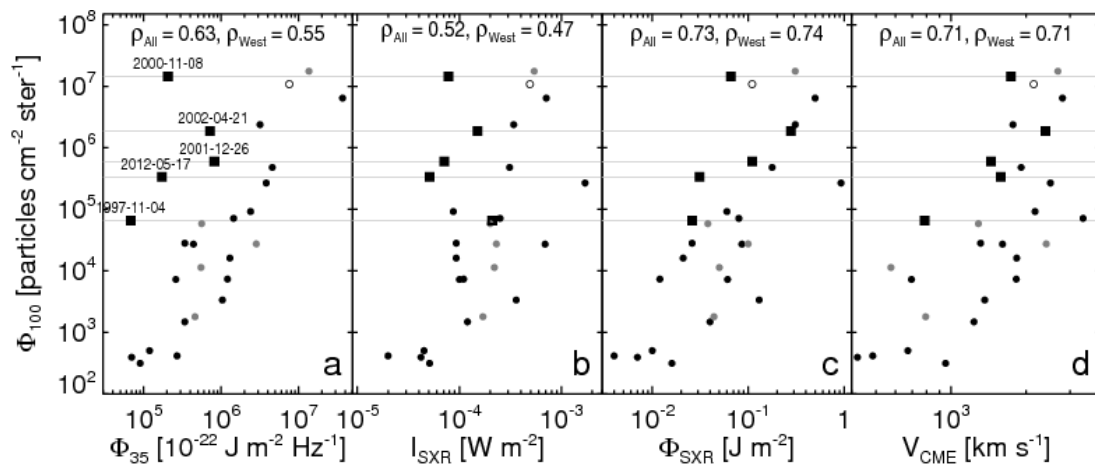


Рис. 3. Соотношения между Φ_{100} и I_{SXR} , Φ_{SXR} , и V_{CME} . Коэффициенты корреляции для 28 событий (ρ_{All}) и для 22 западных событий (ρ_{West}). Значение символов аналогично на рис. 2.

$V_{\text{CME}}=785$ км/с). Естественно предположить, что в протонно-обильных событиях был существенным вклад ускорения протонов на ударных волнах. Для остальных событий прямая тенденция с наименьшим разбросом наиболее выражена на рис. 3, а, а разброс на рис. 3, d намного шире, что указывает на преобладание в них вспышечного ускорения.

Анализ коэффициентов корреляции

Для исключения вторичных корреляций между физически не связанными между собой параметрами мы, следуя [Trottet et al., 2015], мы воспользовались частными коэффициентами корреляции. Они позволяют выяснить собственный вклад каждого из параметров, подавив взаимозависимость между ними. Результаты проведенного анализа корреляций показали преобладание вспышечного вклада в протонные возрастания высоких энергий в 39 событиях, но и вклад ускорения ударными волнами в этих событиях не исключен. Аналогично, преобладание вклада ускорения протонов ударными волнами в пяти обильных событиях выглядит несомненным, но и вклад вспышечного ускорения в этих событиях, вероятно, не исключен.

Выводы

Наиболее высока корреляция между микроволновыми и протонными флюенсами. Это означает зависимость числа протонов как от интенсивности, так и от продолжительности работы процесса их ускорения, естественную при его связи со вспышкой и проблематичную при ускорении на ударной волне. Прямая зависимость вероятности протонного возрастания от пикового потока и длительности микроволнового всплеска, вероятно, обусловлена чувствительностью детекторов протонов и не подтверждает гипотезы о существовании двух разных категорий «импульсных» и «постепенных» событий. Зависимость протонного флюенса от скорости СМЕ с широким разбросом вряд ли может быть причиной тесной корреляции между протонным и микроволновым флюенсом в событиях с мощными вспышками, согласно концепции «Синдрома Большой вспышки». Результаты указывают на статистически преоблада-

ющий вклад вспышечных процессов в ускорение протонов высоких энергий. Скорее всего, ускорение на ударных волнах не является главным для протонов с энергиями >100 МэВ в событиях с мощными вспышками, хотя его вклад несомненен и, возможно, преобладает в более слабых событиях ($F_{35} < 10^3$ сеп).

Выражаем благодарность И.М. Чертоку из Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Москва, Троицк, Россия.

Поддержано грантом Marie Curie RadioSun project (PIRSSES-GA-2011-295272).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aschwanden M.J. GeV Particle Acceleration in Solar Flares and Ground Level Enhancement (GLE) Events // Space Sci. Rev. 2012. V. 171, iss. 1–4. P. 3–21.
- Belov A.A. Properties of solar X-ray flares and proton event forecasting // Advanc. Space Res. 2009. V. 43, iss. 4. P. 467–473.
- Cliwer E.W., Forrest, D.J., Cane, H.V., et al. Solar flare nuclear gamma-rays and interplanetary proton events // ApJ 1989, V. 343. P. 953–970.
- Grechnev V.V., et al. An Updated View of Solar Eruptive Flares and the Development of Shocks and CMEs: History of the 2006 December 13 GLE-Productive Extreme Event // PASJ 2013. V. 65. SP1, S9. P. 18.
- Grechnev V.V., et al., Responsibility of a Filament Eruption for the Initiation of a Flare, CME, and Blast Wave, and its Possible Transformation into a Bow Shock // Solar. Phys. 2015. V. 290, iss. 1. P. 129–158.
- Kallenrode M.-B., Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events // J. Phys. G 2003, V. 29, iss. 5. P. 965–981.
- Temmer M., et al. Acceleration in Fast Halo CMEs and Synchronized Flare HXR Bursts // ApJ 2008. V. 673, iss. 1. P. 95–98.
- Trottet G., et al. Statistical Evidence for Contributions of Flares and Coronal Mass Ejections to Major Solar Energetic Particle Events // Solar Phys. 2015. V. 290, iss. 3. P. 819–839.
- Reames D.V. The Two Sources of Solar Energetic Particles // Space Sci. Rev. 2013. V. 175, iss. 1–4. P. 53–92.
- Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., et al. On the Temporal Relationship between Coronal Mass Ejections and Flares // ApJ 2001. V. 559, iss. 1. P. 452–462.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия