

ПРОГНОЗ ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ С ЭНЕРГИЯМИ ПРОТОНОВ 10–100 МЭВ ПО РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ВСПЫШЕК

Буров В.А., Очелков Ю.П.

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

PREDICTION OF THE INTENSITY OF SOLAR PROTON EVENTS WITH PROTON ENERGIES OF 10–100 MEV BY X-RAY EMISSION OF FLARES

Burov V.A., Ochelkov Yu.P.

Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

The possibility of prediction of solar proton fluxes by the characteristics of flares in the X-ray range is considered. The parameter of flare proton possibility P is introduced. It is shown that the use of the parameter P significantly improves the accuracy of this forecast.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-67-70

Разработка метода прогноза интенсивности солнечных протонных событий (СПС), особенно с энергиями протонов больше 100 МэВ ($J_p > 100$ МэВ), по излучению солнечных вспышек актуально в связи с необходимостью обеспечения радиационной безопасности трансполярных авиаперелетов. Эта достаточно сложная задача, так как многие факторы, определяющие интенсивность событий СПС остаются неизвестными.

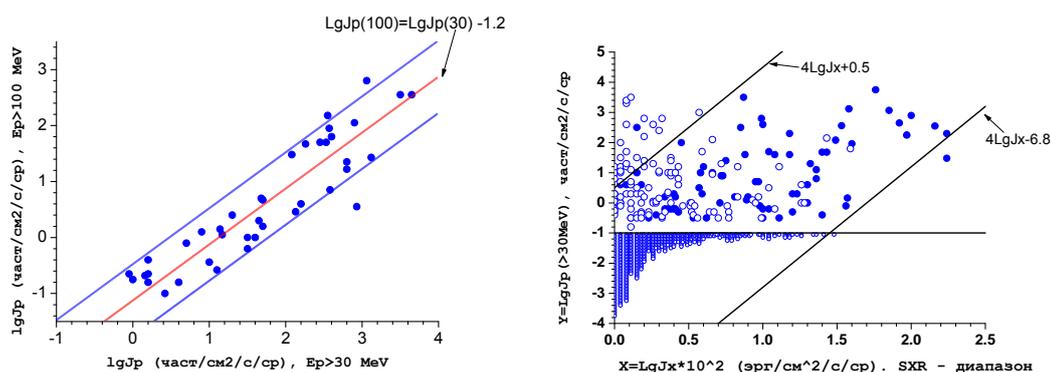


Рис. 1. Слева: Зависимость интенсивности СПС с $J_p > 100$ МэВ от интенсивности СПС с $J_p > 30$ МэВ (23 цикл, 0° – 90° W). Справа: Зависимость интенсивности СПС с энергией протонов с $J_p > 30$ МэВ от максимального потока рентгеновской вспышки J_x (0.1–0.8 нм). Используются данные GOES.

На рис. 1 слева представлена зависимость для прогноза протонов $J_p > 100$ МэВ по протонам $J_p > 30$ МэВ, из которой следует, что даже в таком простейшем случае, когда неизвестным остается только показатель спек-

тра, интенсивность протонов $J_p > 100$ МэВ может быть спрогнозирована (по зависимости, даваемой центральной прямой) с ошибкой в 4,5 раза. Методы прогноза по электромагнитному излучению дадут погрешность не менее порядка величины. На рис. 1 справа приведена зависимость интенсивности 30 МэВ-ных протонов J_p по данным 23 цикла с гелиокоординатами вспышек $0-90^\circ$ W от потока в максимуме J_x . События без СПС, обозначены маленькими кружками (при этом $LgJ_p \leq -1$ част./см²ср); события без СПС, произошедшие на фоне потоков от предыдущих событий, обозначены большими кружками. Наклонные линии $4LgJ_x + 0.5$ и $4LgJ_x - 6.8$ построены в соответствии с исследованием распределений по интенсивности рентгеновских вспышек и СПС. Они ограничивают все поле наблюдаемых значений.

Впервые определение зависимостей между интенсивностями событий связанных со вспышками по их распределениям было использовано в работе [1]. Нами были построены распределения рентгеновских вспышек по потоку в максимуме и событий СПС (см. рис. 2). Они носят степенной характер. Зависимость распределения по интенсивности протонных событий $f(J_p)$ от функции распределения рентгеновских вспышек по потоку в максимуме $f(J_x)$ определяется формулой:

$$f_p(J_p) = \int_0^\infty w(J_p/J_x) f(J_x) dJ_x, \quad \text{где } w(J_p/J_x) \text{ – условная вероятность:}$$

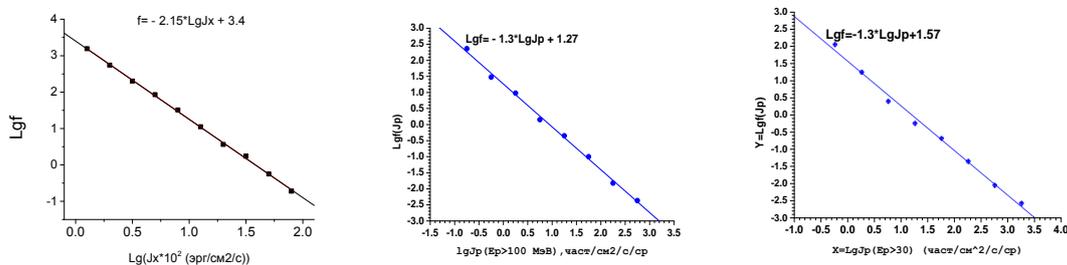


Рис. 2. Слева: Функция распределения $f(J_x)$ рентгеновских вспышек по потоку в максимуме (23 цикл, 0.1–0.8 нм). В центре: Функция распределения СПС по интенсивности в максимуме $f_p(J_p)$ для $E_p > 100$ МэВ (23 и 24 циклы, $0^\circ-90^\circ$ W). Справа: Функция распределения событий СПС по интенсивности в максимуме $f_p(J_p)$ для $E_p > 30$ МэВ (23 цикл, $0^\circ-90^\circ$ W).

Можно показать, что необходимым и достаточным условием, чтобы степенной функции, стоящей под знаком интеграла соответствовала также степенная функция в результате интегрирования, является следующая зависимость условной вероятности от аргументов:

$$w(J_p/J_x) = \sigma \left(\frac{J_p}{J_x} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad \text{где } \gamma = (\alpha - 1)/(\beta - 1), \quad \alpha \text{ – показатель степени } f(J_x), \quad \beta \text{ – показатель степени } f(J_p). \text{ В нашем случае } \alpha = 2.1-2.2 \quad \beta = 1.25-1.3 \text{ и } \gamma = 4 \text{ (см. рис. 2). Среднее по } J_p \text{ значение, при заданном } J_x, \text{ будет так-}$$

же зависеть от J_x по закону J_x^4 . Это функциональная зависимость, однако, использовать ее для прогноза не представляется возможным из-за очень большого разброса значений J_p в 7 порядков величины, определяемым наклонными линиями на рис. 1.

В [2] для прогноза факта наступления события СПС был использован временной параметр $T_{r,1}$ – средняя ширина логарифмического временного профиля рентгеновского излучения на фазе его роста для интервала плотности потока от $J_m/10$ до J_m :

$$T_{r,1} = \int_{t_1}^{t_m} \lg(10 * J(t) / J_m) dt = \int_0^1 (t_m - t) d \lg(J(t) * 10 / J_m) = \langle t_m - t \rangle$$

Здесь t_m – момент времени максимума вспышки, t_1 – момент времени, когда плотность потока на фазе роста равна $J_m/10$ (J_m – плотность потока в максимуме вспышки). Можно ввести также параметр $T_{r,x}$: среднюю ширину логарифмического временного профиля для интервала плотности потока от $J_m/10^x$ до J_m , ($x \leq 1$)

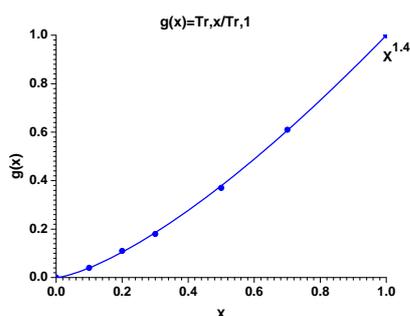


Рис. 3. Зависимость отношения $T_{r,x}/T_{r,1}$ от x .

В [3] было показано, что эти величины связаны соотношением $T_{r,x}/T_{r,1} = x^{1.4}$ (см. рис. 3). В случае если временной профиль не наблюдается для интервала плотности потока от $J_m/10$ до J_m (это встречается для небольших вспышек классов М1–М3), следует использовать параметр $T_{r,x}$. Можно показать, что интенсивность события СПС возрастает как с увеличением J_x , так и с увеличением $T_{r,1}$ (см. рис. 4, слева). Поэтому можно ввести параметр $P = 10 * (T_{r,1} / 60 + 0.35 * \text{Lg}(J_{x,m} * 10^3)) + 2$, где $T_{r,1}$ в минутах, $J_{x,m}$ в $\text{Ватт}/\text{м}^2$, который определяет «протонность» рентгеновских вспышек. На рис. 4, справа, построена функция распределения рентгеновских всплесков 23 цикла по параметру P . Это распределение степенное с показателем степени, примерно совпадающим с показателем степени функций распределения по интенсивности СПС.

Отсюда следует функциональная зависимость $\text{Lg}J_p = P + \text{const}$. На рис. 5 построены зависимости интенсивности СПС от P , из которых видно, что они позволяют существенно улучшить прогноз интенсивности СПС, по сравнению с зависимостью на рис. 1, справа.

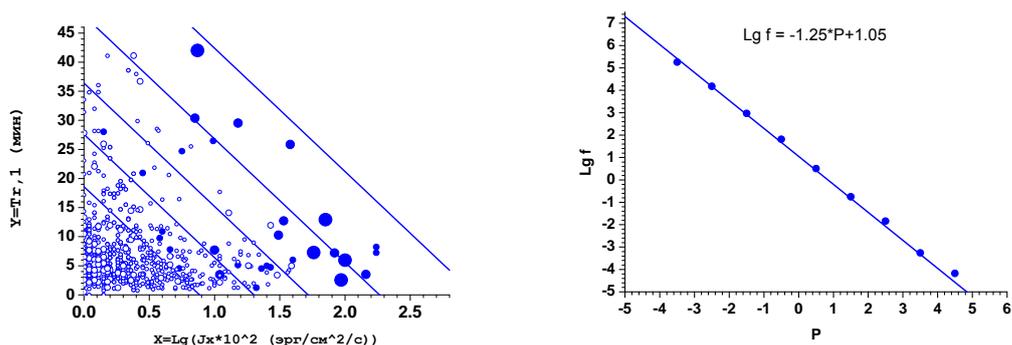


Рис. 4. Слева: Зависимость $T_{r,1}$ от J_m (23 цикл, 0^0-90^0W) с уровнем СПС (> 100 МэВ). Маленькие окружности – отсутствие СПС, большие окружности – отсутствие СПС из-за высокого фона от предыдущих событий, маленькие кружки – события с $Jp > 1$ част/см²ср, средние кружки – события с $Jp > 10$, большие кружки события с $Jp > 100$. Наклонные прямые линии соответствуют значениям $P = -1.9, -0.4, 1, 3$. Справа: Распределение рентгеновских вспышек по параметру P .

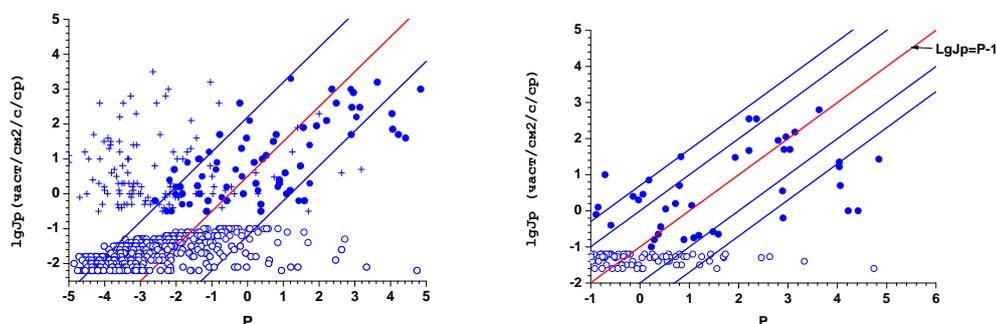


Рис. 5. Слева: Зависимость Jp от P для $E_p > 30$ МэВ (23 цикл, $0-90^0W$). Справа: Зависимость Jp от P для $E_p > 100$ МэВ (23 цикл, $0-90^0W$)

Выводы

1. Средняя величина интенсивности в максимуме СПС при фиксированном значении потока в максимуме рентгеновской вспышки J_x зависит от J_x по закону J_x^4 .
2. Интенсивность СПС максимуме зависит от P по закону: $Lg Jp \sim P$. Это соотношение может быть использовано для прогноза СПС, что позволяет существенно улучшить прогноз интенсивности СПС.

Литература

1. Беловский М.Н., Очелков Ю.П. Особенности генерации электромагнитного и корпускулярного излучения солнечных вспышек // Астрон.ж., 1980, **57**, с. 151.
2. Буров В.А., Очелков Ю.П. Научастиг появления геоэффективных потоков протонов в околоземном космическом пространстве // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2013, Бюл. № **17**, 20.06.
3. Очелков Ю.П. Скейлинг временного развития всплесков мягкого рентгеновского излучения Солнца на фазе роста // Гелиогеофизические исследования, 2016, **15**, с. 1–31.