



УДК 524.1-352

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ПО ТЕПЛОВОМУ РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

В.А. Буров¹, Ю.П. Очелков¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Россия, г. Москва

Разработка метода прогноза интенсивности солнечных протонных событий (СПС), особенно с энергиями протонов больше 100 МэВ ($J_p > 100$ МэВ), по электромагнитному излучению солнечных вспышек актуально в связи с необходимостью обеспечения радиационной безопасности трансполярных авиаперелетов. В работе рассматривается возможность прогноза интенсивности СПС по мягкому рентгеновскому излучению солнечных вспышек. Приводятся данные о возможной точности прогноза по интенсивности в максимуме рентгеновской вспышки и при использовании временного параметра, характеризующего рост рентгеновского излучения до максимума.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вспышки солнечного рентгеновского излучения, протонные события, методы прогноза.

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогноз по рентгеновскому излучению, несмотря на то, что рентгеновская вспышка в мягком диапазоне является тепловым процессом, обладает рядом преимуществ. Во-первых, рентгеновское излучение наблюдается со спутников круглосуточно, во-вторых данные по рентгеновскому излучению вспышек доступны в реальном времени, в-третьих, согласно эффекту Нойперта [Беловский, Очелков; 1980] поток мягкого рентгеновского излучения в максимуме вспышки для большинства вспышек пропорционален интегральному потоку жесткого рентгеновского излучения за всю вспышку.

Прогноз СПС по электромагнитному излучению вспышек достаточно сложная задача, так как многие факторы, определяющие интенсивность событий СПС, остаются неизвестными. В частности, неизвестна связь между быстрыми вспышечными электронами, которые вызывают нагрев плазмы, до температуры необходимой для теплового рентгеновского излучения солнечных вспышек, и ускоренными протонами, которые мы наблюдаем у Земли, неизвестно где и как ускоряются протоны, как они выходят в межпланетную среду, как связаны временные интервалы ускорения электронов и протонов.

Кроме того, многие эффекты распространения протонов, приводящие к большому разнообразию их временных профилей, остаются неясными.

Чтобы оценить возможные точности прогноза интенсивности СПС рассмотрим простейший случай прогноза, когда по наблюдениям у Земли протонов с энергиями $E_p > 30$ МэВ прогнозируется интенсивность протонов с энергиями $E_p > 100$ МэВ. Результаты такого прогноза показаны на рис. 1, где представлена зависимость между интенсивностью протонов с $E_p > 100$ МэВ от интенсивности протонов с $E_p > 30$ МэВ наблюдаемых у Земли. Из рисунка 1 следует, что даже в таком простейшем случае, когда неизвестным остается только показатель спектра, интенсивность протонов с $E_p > 100$ МэВ может быть спрогнозирована (по зависимости даваемой центральной прямой) с ошибкой в 4,5 раза (прямые на рисунке соответствуют теоретической зависимости $\lg J_p (> 100) = \lg J_p (> 30) + C$).

Таким образом, по электромагнитному излучению солнечных вспышек вряд ли можно прогнозировать интенсивность СПС с точностью лучше, чем порядок величины.

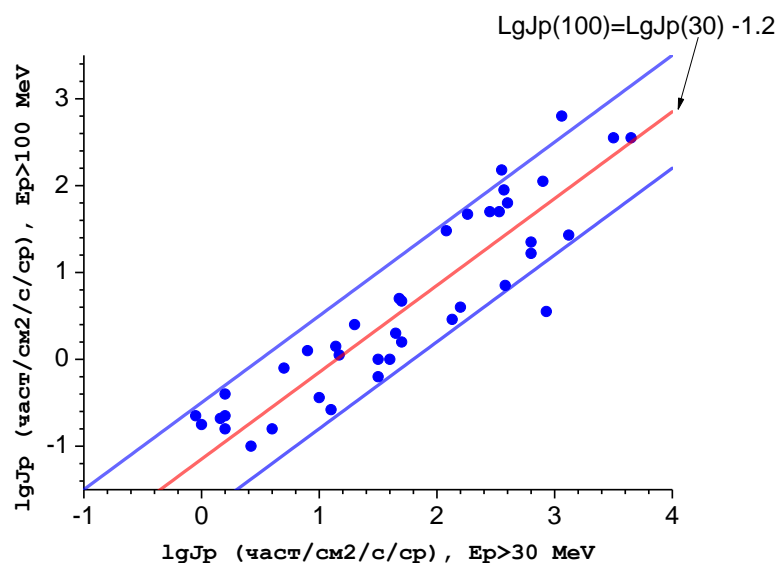


Рис. 1. Зависимость интенсивности СПС с $J_p > 100$ МэВ от интенсивности СПС с $J_p > 30$ МэВ (23 цикл, 0^0-90^0W). Используются данные GOES.

Рассмотрим теперь возможности прогноза интенсивности СПС по потоку рентгеновского излучения в максимуме рентгеновской вспышки.

2. ПРОГНОЗ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ ПОТОКУ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На рисунке 2 приведена зависимость интенсивности 30 МэВ-ных протонов J_p по данным 23 цикла с гелиокоординатами вспышек $0 - 90^0 W$ от потока в максимуме J_x . События без СПС, обозначены маленькими кружками (их ордината условна, $\lg J_p \leq -1$ част./см²ср; события без СПС, произошедшие на фоне потоков от предыдущих событий, обозначены большими кружками. Их ордината также условна она не превышает значение интенсивности наблюдаемого фонового потока от предыдущих СПС. Наклонные линии $4\lg J_p + 0.5$ и $4\lg J_p - 6.8$ 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 получено в работе [Буров, Очелков; 2013]. Нами были построены распределения рентгеновских вспышек по потоку в максимуме и распределения СПС по интенсивности в максимуме (см. рис. 3 и 4). Они носят степенной характер в большом интервале изменения интенсивностей.

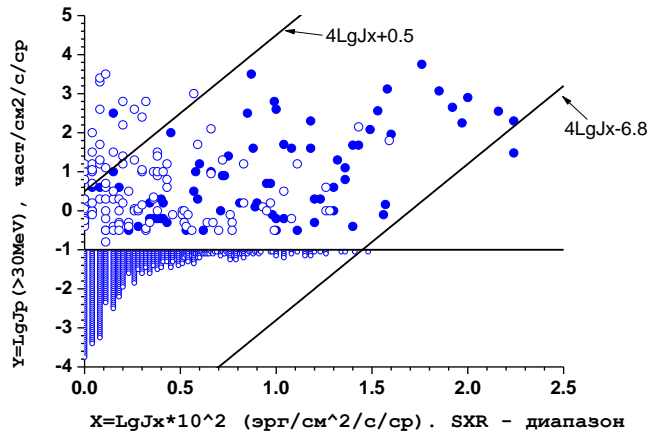


Рис.2. Зависимость интенсивности СПС с энергией протонов с $E_p > 30$ МэВ от максимального потока рентгеновской вспышки J_x (0.1 – 0.8 нм). Используются данные GOES.

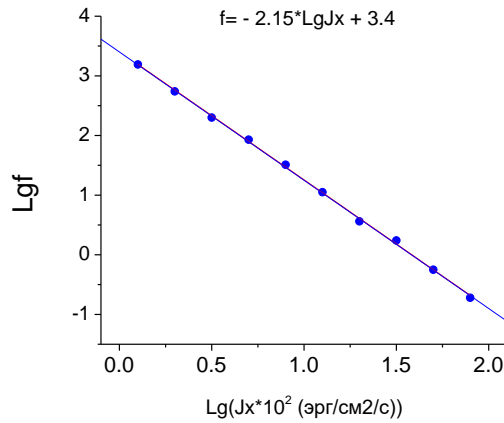


Рис. 3. Функция распределения $f(J_x)$ рентгеновских вспышек по потоку в максимуме (23 цикл, 0.1-0.8нм).

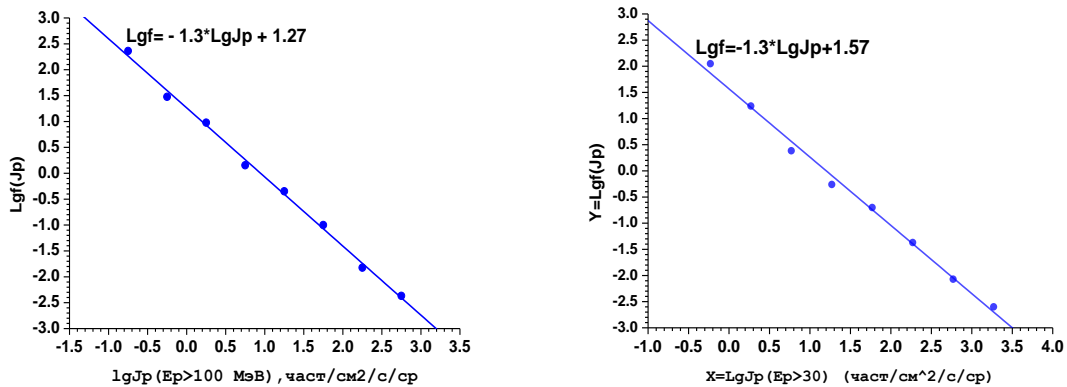


Рис. 4. Слева: Функция распределения СПС по интенсивности в максимуме $f_p(J_p)$ для $E_p > 100$ МэВ (23 и 24 циклы, 0° – 90° W). Справа: Функция распределения событий СПС по интенсивности в максимуме $f_p(J_p)$ для $E_p > 30$ МэВ (23 цикл, 0° – 90° W).

Зависимость распределения по интенсивности протонных событий $f(J_p)$ от функции распределения рентгеновских вспышек по потоку в максимуме $f(J_x)$ определяется формулой:

$$f_p(J_p) = \int_0^{\infty} w\left(\frac{J_p}{J_x}\right) f(J_x) dJ_x$$

где $w\left(\frac{J_p}{J_x}\right)$ – условная вероятность.

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:

$$w\left(\frac{J_p}{J_x}\right) = \sigma \left(\frac{J_p}{J_x}\right)^{\frac{1}{\gamma}},$$

где $\gamma = \frac{\alpha-1}{\beta-1}$, α – показатель степени степенной функции $f(J_x)$, β – показатель степени функции $f_p(J_p)$. В нашем случае $\alpha = 2.1 - 2.2$, $\beta = 1.25 - 1.3$, и $\gamma \approx 4$ (см. рисунки 3 и 4). Среднее по J_p значение, при заданном J_x , будет также зависеть от J_x по закону:

$$\langle J_p \rangle \approx J_x^4.$$

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. 2.

Из рисунка 2 следует также необходимость использования для прогноза интенсивности СПС других параметров рентгеновских вспышек.

3. ПРОГНОЗ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ ПОТОКУ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРУ ВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ВСПЫШКИ

В работе [Буров, Очелков; 2013] для прогноза факта наступления события СПС был использован временной параметр развития рентгеновской вспышки: $T_{r,1}$ – средняя ширина логарифмического временного профиля рентгеновского излучения на фазе его роста для интервала плотности потока от $J_m/10$ до J_m :

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

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 , ($x \leq 1$).

В работе [Очелков; 2016] было показано, что эти величины связаны соотношением $T_{r,x}/T_{r,1} = x^{1.4}$ (см. рис. 5). В случае, если временной профиль не наблюдается для интервала плотности потока от $J_m/10$ до J_m (это встречается для небольших вспышек классов M1–M3), следует использовать параметр $T_{r,x}$ и по нему рассчитывать параметр $T_{r,1}$.

Можно показать, что интенсивность события СПС возрастает как с увеличением J_x так и с увеличением $T_{r,1}$ (для 100 МэВ-ных протонов см. рис. 6). Поэтому можно ввести параметр $P = 10 \times (T_{r,1}/60 + 0.35 \lg(J_{x,m} \times 10^3)) + 2$, где $T_{r,1}$ в минутах, $J_{x,m}$ в $\text{Ватт}/\text{м}^2$, который определяет «протонность» рентгеновских вспышек.

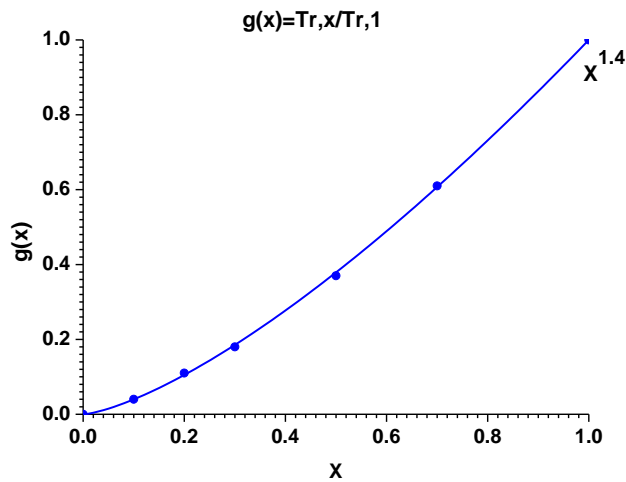


Рис. 5. Зависимость отношения $T_{r,x}/T_{r,1}$ от x .

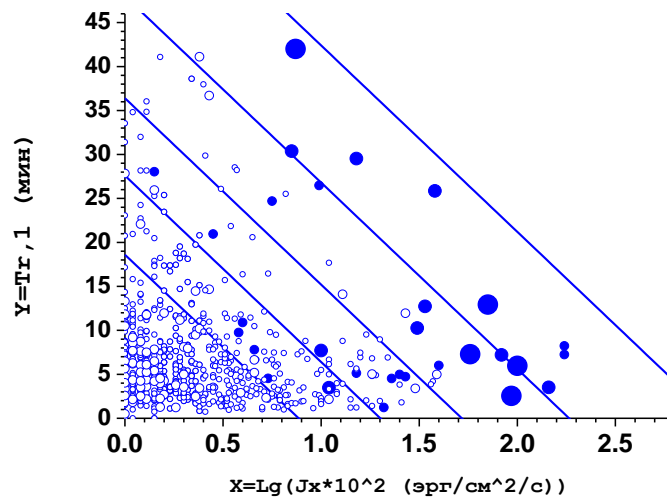


Рис. 6. Зависимость $T_{r,1}$ от J_m (23 цикл, 0° – 90° W) с уровнем СПС (> 100 МэВ). Маленькие окружности – отсутствие СПС, большие окружности – отсутствие СПС из-за высокого фона от предыдущих событий, маленькие кружки – события с $J_p > 1$ част/см²ср, средние кружки – события с $J_p > 10$, большие кружки – события с $J_p > 100$. Наклонные прямые соответствуют значениям $P = -1.9, -0.4, 1, 3$.

Интересно сравнить распределение вспышек по параметру P и по интенсивности СПС. На рис. 7 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:]

$$\lg J_p = P + const \tag{1}$$

На рисунках 8 и 9 построены зависимости интенсивности СПС от P (это функциональные зависимости вида (1)). Из этих зависимостей следует, что использование соотношения (1) для прогноза интенсивности СПС позволяет существенно улучшить прогноз интенсивности СПС, по сравнению с зависимостью на рис. 2. Так интенсивность почти 80% протонных событий с энергией протонов > 100 МэВ может быть спрогнозирована с ошибкой в 50 раз (для $P > -1$).

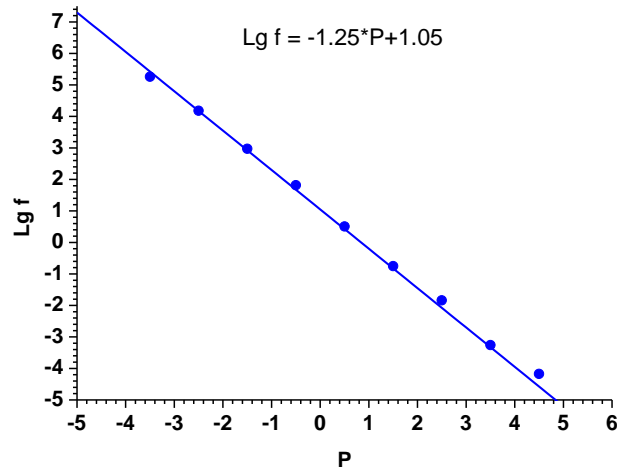


Рис. 7. Распределение рентгеновских вспышек по параметру P (23 цикл, 0.1–0.8нм).

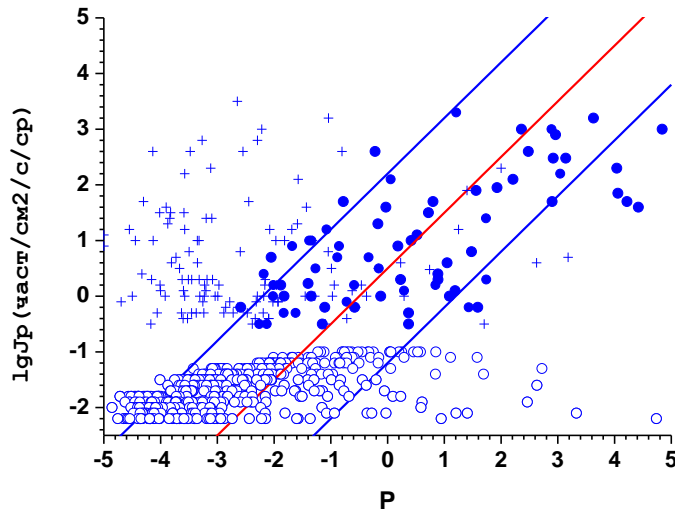


Рис. 8. Зависимость J_p от P для $E_p > 30$ МэВ (23 цикл, 0–90°W).

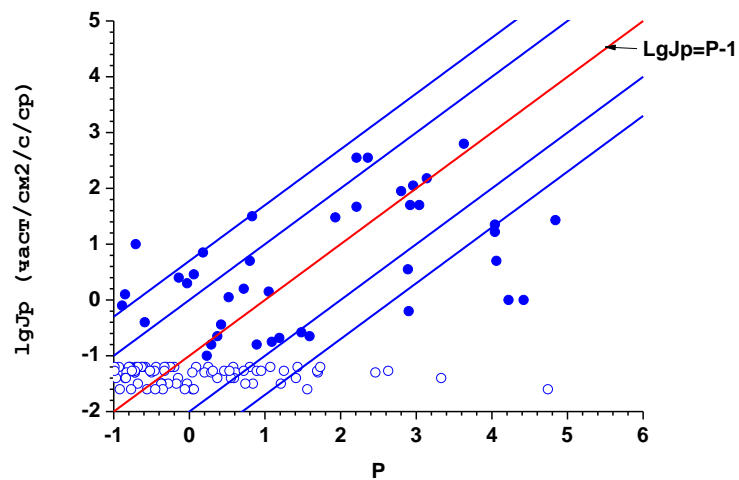


Рис. 9. Зависимость J_p от P для $E_p > 100$ МэВ (23 цикл, 0–90°W).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведем основные результаты, полученные в работе.

В работе рассмотрен вероятностный подход к определению зависимости интенсивности события СПС в максимуме от интенсивности в максимуме предшествующей рентгеновской вспышки и временного параметра характеризующего ширину временного профиля рентгеновской вспышки на фазе роста.

Показано что:

1. Средняя величина интенсивности в максимуме СПС при фиксированном значении потока в максимуме рентгеновской вспышки J_p зависит от J_x по закону J_x^4 .
2. Интенсивность СПС в максимуме зависит от параметра протонности рентгеновской вспышки P по закону: $\lg J_p \sim P$.
3. Соотношение $\lg J_p \sim P$ может быть использовано для прогноза, что позволяет существенно улучшить прогноз интенсивности СПС.

ЛИТЕРАТУРА

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

THE POSSIBILITY OF PREDICTION OF SOLAR PARTICLE EVENT INTENSITIES BY THERMAL X-RAY EMISSION OF SOLAR FLARES

Burov V.A., Ochelkov Yu.P.

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.

KEYWORDS: FLARES OF SOLAR X-RAY RADIATION, PROTON EVENTS, FORECAST METHODS.