КЛАССИФИКАЦИЯ ВСПЫШЕК, ОСНОВАННАЯ НА МАКСИМАЛЬНОМ ПОТОКЕ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВСПЫШКИ

Бруевич Е.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, Москва

CLASSIFICATION OF SOLAR FLARES BASED ON THE MAXIMUM FLUX IN SOFT X-RAYS AND ON DURATION OF FLARE

Bruevich E.A.

Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute, Moscow

Solar flare activity is characterized by classification systems, both in optical and X-ray ranges. A new classification of solar flares is proposed – the X-ray index of flare XI, based on measurements of radiation in the range 0.1–0.8 nm on the GOES satellites. The XI index has a clear physical interpretation associated with the total flare energy in the range 0.1–0.8 nm. XI is easily calculated for each flare with use of available GOES data. The XI index can be used to assess flares along with other important geoeffective parameters.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-71-74

Вспышки на Солнце представляют собой комплекс физических явлений в плазме, объединённых в один взаимосвязанный процесс накопления и выделения энергии. Ультрафиолетовое, рентгеновское, гамма-излучение, а также часть инфракрасного и радиоизлучения может регистрироваться только из космоса. В последние годы с развитием космических технологий, и в частности, благодаря регулярному проведению рентгеновских наблюдений Солнца на спутниках серии GOES и в крайнем ультрафиолетовом диапазоне на орбитальной обсерватории SDO, вспышечная активность стала доступнее для анализа. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение вспышек резко увеличивают ионизацию в верхних слоях атмосферы Земли и в ионосфере. Частицы высоких энергий от вспышек, проникая в верхнюю атмосферу Земли, разрушают озоновый слой. Ударные волны и выбросы солнечной плазмы после больших вспышек вызывают сильные возмущения магнитосферы – магнитосферные бури. На ключевую роль процесса образования предвспышечного токового слоя в короне в окрестности особой линии магнитного поля обратили внимание Сомов и Сыроватский [1]. Токовый слой представляет собой магнитоплазменную структуру, как минимум двухмерную и, как правило, двух масштабную, что позволяет объяснить характерные для вспышки особенности накопления и выделения энергии. В [2] впервые была введена величина, определяющая вспышечный индекс в оптическом диапазоне $Q = it$, пропорциональная полной энергии, излученной вспышкой. В этом соотноше-

нии i представляет собой класс H_α -вспышки в специальной шкале, t определяет длительность H_α -вспышки в минутах. Величина коэффициента пропорциональности i зависит от класса вспышки. В настоящее время для Q принято обозначение FI (Flare Index) [2, 3]. Величина FI вычисляется ежедневно и корректируется с учетом полного времени наблюдений в течение суток. Архивные данные о величине FI с 1976 по 2014 гг. доступны на сайте NGDC NOAA [4].

Принятая во всем мире система оценок мощности солнечных вспышек по рентгеновскому излучению (классы C, M и X) в настоящее время опирается на измерения потока излучения в SXR (Soft X-ray Emission) – области 0.1–0.8 нм. Самые мощные вспышки по данной классификации – вспышки класса X соответствуют максимальному потоку более 10^{-4} Вт/м² в полосе 0.1–0.8 нм, вспышки рентгеновских классов M1–M9 соответствуют потоку от 10^{-5} Вт/м² до 10^{-4} Вт/м², вспышки рентгеновских классов C1–C9 – от 10^{-6} Вт/м² до 10^{-5} Вт/м².

Рис. 1. Вспышка 09.03.11 (X1.6) – слева. Вспышка 12.07.12 (X1.6) – справа. Показаны моменты начала, максимума и четверти потока в максимуме в рентгеновском диапазоне 0.1–0.8 нм.

Что касается рентгеновской классификации, то на примере вспышек 9.03.11 и 12.07.12 (рис. 1) видна ее упрощенность. Эти вспышки имеют примерно одинаковый рентгеновский класс X1.6 и X1.4, однако, их полные энергии, излученные в данном диапазоне, сильно различаются: $E_{0.1-0.8} = 0.15$ Дж/м² для вспышки 9.03.11 класса X1.6 и $E_{0.1-0.8} = 0.75$ Дж/м² для вспышки 12.07.12 класса X1.4 соответственно. Самые мощные вспышки 24 цикла, произошедшие в сентябре 2017 г. подтверждают, что классификация, основанная лишь на величине максимальной амплитуды, не несет полной информации. По данной классификации вспышка 6 сентября 2017 г. класса X9.3 считается мощнее, чем вспышка X8.2 10 сентября 2017 г., произошедшая из той же активной области. На самом деле вспышка X8.2 была намного длительнее, чем вспышка X9.3, фаза спада у нее – более пологая, в итоге – полная энергия $E_{0.1-0.8}$ у вспышки X8.2 оказалась почти на порядок больше (2.52 Дж/м² против 0.35 Дж/м²).

Подчеркнем, что полная энергия $E_{0.1-0.8}$, излученная вспышкой, вычисляется в данной работе путем интегрирования по времени потока $F_{0.1-0.8}(t)$ с учетом величины фонового излучения $F_{\text{background}}$ от начала до окончания вспышки:

$$E_{0.1-0.8} = \int (F_{0.1-0.8}(t) - F_{\text{background}}) dt. \quad (1)$$

Существенная разница в полной энергии вспышек 9.03.11 и 12.07.12 объясняется различием формы кривых блеска и в длительности вспышек.

Для определения нового индекса XI воспользуемся представлением о четверти величины потока в максимуме (FWQM – full width quarter-max). На рис. 1 величина a соответствует времени в минутах, прошедшему от уровня потока в четверть максимального до максимума на фазе подъема, величина b соответствует времени в минутах от максимума до уровня потока в четверть максимального на фазе спада.

Определим величину вспышечного индекса XI как произведение величины потока рентгеновского излучения 0.1–0.8 нм в максимуме вспышки (Ватт/м^2) на величину длительности вспышки на уровне FWQM (четверти величины потока в максимуме), равную $a + b$ и выраженную в секундах:

$$XI = F_{0.1-0.8}^{\text{max}} \cdot (a + b). \quad (2)$$

Величина XI имеет размерность Дж/м^2 и примерно равна по величине полной энергии, вычисленной как интеграл под кривой блеска за вычетом фона по формуле (1).

Рис. 2. Зависимость полной энергии вспышки $E_{0.1-0.8}$ от рентгеновского вспышечного индекса XI для 36 вспышек 24 цикла. Вспышки с последующими протонными событиями представлены закрашенными звездочками, вспышки, не сопровождаемые протонными событиями, представлены полными звездочками. Показана линия квадратичной регрессии и величина стандартного отклонения. Отмечены самые крупные вспышки 24 цикла 06.09.2017 и 10.09.2017.

Взаимосвязь между $E_{0.1-0.8}$ и XI описывается уравнением:

$$E_{0.1-0.8} = 0.0198 + 0.658 \cdot XI + 0.106 \cdot XI^2. \quad (3)$$

Зависимость, представленная на рис. 3, показывает, что вычисление индекса XI может быть полезно для понимания связи между потоками в рентгеновском диапазоне и величиной протонных событий.

Рис. 3. Зависимость рентгеновского индекса XI для 50 родительских вспышек от величины потоков протонов в диапазоне $E > 10$ МэВ (слева) и $E > 100$ МэВ (справа) в 23 и 24 циклах. Отмечены события, сопровождающиеся GLE.

Выводы

Предложенная в данной работе методика определения рентгеновского индекса вспышек XI по аналогии с оптическим вспышечным индексом FI имеет следующие преимущества:

1. Рентгеновский индекс XI легко вычисляется по формуле (2). Данные о величинах a , b , $F_{0.1-0.8}^{\max}$, $F_{\text{background}}$ доступны на сайте спутников серии GOES с 1978 по настоящее время. Соответственно для каждой вспышки может быть вычислен рентгеновский индекс XI, начиная с 1978 г.

2. Рентгеновский индекс XI является аналогом полной энергии вспышки $E_{0.1-0.8}$, см. (1), связь между XI и $E_{0.1-0.8}$ описывается уравнением (3), в результате чего знание индекса XI дает возможность быстрой оценки важнейшего геоэффективного параметра вспышки $E_{0.1-0.8}$.

3. По величине индекса XI, также как и по величине $E_{0.1-0.8}$, можно определить вспышки с последующими протонными событиями (при условии подходящей для распространения потоков протонов локализации активной области в западной части диска Солнца).

4. Рентгеновский индекс XI, также как и $E_{0.1-0.8}$, является важнейшим геофизическим параметром вспышки, связанный с вариациями солнечных космических лучей и последующим возмущением магнитосферы и ионосферы Земли.

Литература

1. Сомов Б.В., Сыроватский С.И. // УФН, 1976, **120** (4), 217.
2. Kleczek J., Publ. Czech Centr. // Astron. Inst., 1952, No. **22**.
3. Ozgus A., Atac T., Rybak J. // Solar Physics, 2013, **214**, 375.
4. NGDC NOAA: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/index/flare-index/>