

МАКСИМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ В СОВРЕМЕННУЮ ЭПОХУ

Мерзляков В.Л.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

THE MAXIMUM ENERGY OF SOLAR FLARE IN MODERN EPOCH

Merzlyakov V.L.

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS,
Moscow, Troitsk, Russia*

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-219-222>

The energy of the solar flare is studied within the framework of the electron acceleration model in the magnetic X-singularity. The dependence of the energy magnitude on the parameters of the acceleration zone is obtained. The main energetic parameter is the diameter of the acceleration zone. For the observed extreme events in 1859, 1940, 2003 years, having an energy of $\approx 5 \cdot 10^{32}$ erg, this diameter is about 300 km. In the case of the event 774 year, which is associated with a flare with energy $2 \cdot 10^{33}$ erg, the diameter is at least 1200 km. Such a size seems unrealistic in our model. Then it can be assumed with a high probability that the observed powerful flares have the maximum energy in the modern era. And the frequency of these powerful events is about 70 years.

Введение

Солнечная вспышка является мощным энергетическим явлением, которое оказывает влияние на гелиосферу. В связи с этим возникает необходимость прогнозировать появление вспышки и её энергию. В указанном контексте представляется важным знать величину максимальной энергии вспышки и частоту появления таких экстремальных событий.

Решение обозначенной выше проблемы может основываться на различных факторах. Эти факторы обычно связывают с параметрами активных областей, где и происходят мощные вспышки. На основе протяженности активной области получено предельное значение энергии $3 \cdot 10^{33}$ эрг [1]. Используя зависимости для магнитных полей, установлена граница энергии в $8 \cdot 10^{33}$ эрг [2]. За время реальных наблюдений вспышек, начиная с известного события 1859 г., максимальная энергия оценивается $5 \cdot 10^{32}$ эрг [3].

Энергия солнечной вспышки

Энергия солнечной вспышки определяется потоком ускоренных электронов $\partial N_e / \partial t$, энергией этих электронов w_e и длительностью ускорения t_f . При этом основная энергия вспышки приходится на хромосферные зоны ускорения, а корональная зона дает около 10%. Тогда интегральная энергия солнечной вспышки может быть представлена как:

$$E_f \approx 2.2 \langle w_e \rangle \langle \partial N_e / \partial t \rangle t_f. \quad (1)$$

Проведем анализ выражения (1) в рамках модели ускорения частиц в магнитной X-особенности [4]. Конфигурация магнитного поля в окрестности этой X-особенности приведена на рисунке, где вектора показывают направления магнитного поля, а их размер пропорционален напряженности. Зона ускорения находится внутри показанной конфигурации рисунка, и её граница определяется некой критической напряженностью магнитного поля. Такая граница вытянута в горизонтальном направлении (рисунок) и может быть аппроксимирована прямоугольником $a \times b$. Тогда поток ускоряемых электронов через эту прямоугольную зону зависит от окружающей электронной плотности n_e , тепловой скорости электронов v_e , геометрии силовых линий (угол с радиальным направлением β) и вертикальной протяженности зоны ускорения H . В итоге имеем средний поток ускоряемых электронов:

$$\langle \partial N_e / \partial t \rangle = 0.5 \langle n_e \rangle (1/3)^{1/2} \langle v_e \rangle (2a \cdot \cos \beta + 2b \cdot \sin \beta) \cdot H \quad (2)$$

Для изучаемых мощных вспышек температура $\sim 10^7$ К [5]. Окружающая температура хромосферной плазмы $\sim 10^5$ К. Для скорости движения потока электронов можно принять среднюю температуру $T_e = 10^6$ К, тогда величина тепловой скорости $\langle v_e \rangle \approx 4.2 \cdot 10^8$ см/с. Протяженность рассматриваемой зоны ускорения равна высоте хромосферы $H = 2.5 \cdot 10^3$ км [6]. В таком случае средняя плотность $\langle n_e \rangle = 10^{11}$ см $^{-3}$. Анализ магнитной конфигурации рисунка показал, что параметр в скобках (2) можно представить зависимостью от большего размера зоны ускорения $\approx 1.5 \cdot a$. С учетом сделанных выше оценок средний поток ускоряемых электронов согласно выражению (2) $\langle \partial N_e / \partial t \rangle = 2 \cdot 10^{27} \cdot a$ электрон/с.

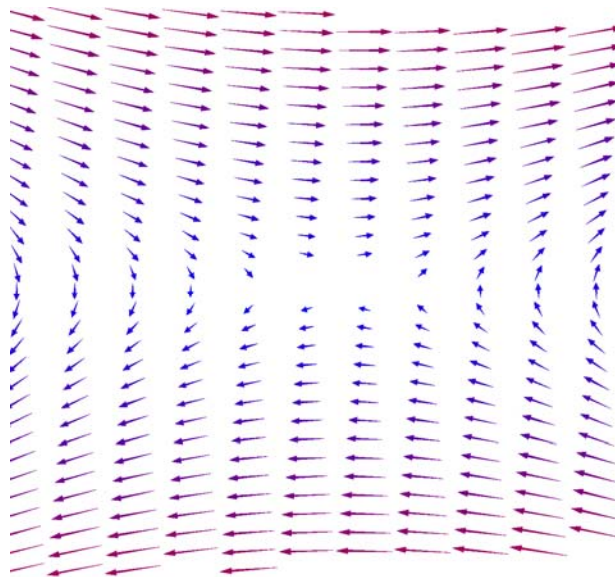


Рисунок.

Согласно проведенному исследованию [7] средняя энергия ускоренного электрона зависит от температуры T_e в зоне ускорения $\langle w_e \rangle = 3 \cdot 10^{-2} T_e$ эв или $4.8 \cdot 10^{-14} T_e$ эрг.

Вспышки с большой энергией имеют максимальную длительность, которая определяется временем жизни мезогранулы $t_f = 2 \cdot 10^3$ с. В итоге интегральная энергия солнечной вспышки (1) зависит от размера области ускорения a и температуры T_e как

$$E_f \approx 4.2 \cdot 10^{17} \cdot a \cdot T_e \text{ эрг} \quad (3)$$

Величины температуры T_e от энергии вспышки слабая, что демонстрирует зависимость T_e от класса вспышки [5]. А класс вспышки, определяемый по потоку мягкого рентгеновского излучения, пропорционален интегральной энергии вспышки. Как видно из приведенной зависимости [5] для класса >X5 температура остается практически неизменной ≈ 40 МК. В такой ситуации энергия мощных вспышек линейным образом зависит от размера зоны ускорения (3).

Проведем оценки размера зоны ускорения для случаев экстремальных событий. Из реально наблюдаемых мощных вспышек наибольшую энергию $5 \cdot 10^{32}$ эрг имело событие 1 сентября 1859 г. [3]. Размер зоны ускорения этого события составил ≈ 300 км согласно соотношению (3). Этот размер в 3 раза превышает такой размер у вспышек класса X [4].

Отмечаются случаи импульсного роста космических лучей, некоторые из которых интерпретируют как действие мощных солнечных вспышек. Самое известное событие 774/5 г. приписывают солнечной вспышке с энергией как минимум $\approx 2 \cdot 10^{33}$ эрг [3]. В таком случае из формулы (3) получаем размер $a \approx 1200$ км, который на порядок больше, чем для самых мощных вспышек класса X. Такое различие приводит к трудности объяснения условий появления такой зоны ускорения в рамках рассматриваемой модели [4]. И эта трудность указывает на невспышечный характер события 774 г. Также есть весомые подтверждающие этот вывод аргументы, которые указывают на это событие как Галактический гамма-всплеск [8].

Выводы

В результате проведенного исследования было получено аналитическое выражение для величины энергии мощной вспышки (3). Для вспышек класса более X5 в этой зависимости определяющим параметром является наибольший размер зоны ускорения частиц во время импульсной фазы вспышки. Анализ полученной зависимости (3) показал, что события 774 г. с энергией $\sim 10^{33}$ эрг не являются солнечным. В таком случае граничные оценки вспышек в работах [1, 2] представляются существенно завышенными.

Наиболее вероятным сценарием для экстремальных событий в современную эпоху следует считать такой, когда вспышки с экстремальной энергией уже реально регистрировались. К этим событиям относится вспышка 1859 г., которая имеет класс X45 [9]. Практически такую же энергию, с учетом неопределенностей оценок, класса X35 – X40 имели вспышки 23 сентября 1940 г. [10] и 3 ноября 2003 г. [11]. В таком случае появление вспышек с экстремальной энергией происходит с интервалом ≈ 70 лет.

Литература

1. Watari S. // *Earth, Planets and Space*, 2022, v. 74, 115 (12pp).
2. Katsova M.M., Obridko V.N., Sokoloff D.D., Livshits I.M. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2021, v. 61, No. 7, pp. 1063–1068.
3. Cliver E.W., Hayakawa H., Love J.J., Neidig D.F. // *Astrophys. J.*, 2020, v. 903, 41 (16pp).
4. Мерзляков В.Л. // Труды Всероссийской конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2020”, СПб, ГАО РАН, 2020, с. 209-212.
5. Warmuth A., Mann G. // *Astron. and Asrtophys.*, 2016, v. 588, A115 (14pp).
6. Мерзляков В.Л. // Доклад на Всероссийской конференции "Магнетизм и активность Солнца - 2022". КрАО РАН. Крым. 22-26 августа 2022 г. <https://sun.crao.ru/video-2022>
7. Мерзляков В.Л. // Труды Всероссийской конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2021”, СПб, ГАО РАН, 2021, с. 197-198.
8. Павлов А.К., Блинов А.В., Васильев Г.И., и др. // *Письма в Астрон. Ж.*, 2014, т. 40, № 10, с. 706-713.
9. Cliver E.W., Dietrich W.F. // *J. Space Weather Space Clim.*, 2013, v. 3, A31 (15pp).
10. Hayakawa H., Oliveira D.M., Shea M. A., et al. // *MNRAS*, 2022, v. 517, p. 1709-1723.
11. Brodrick D., Tingay S., Wieringa M. // *J. Geophys. Res.*, 2005, v. 110, A09S36 (8pp.)