

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Мерзляков В.Л.

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

THE ENERGY FACTORS OF SOLAR FLARES

Merzlyakov V.L.

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

Flares in the active regions of the Sun vary in energy by 5 orders of magnitude. It has been investigated for factors that lead to such differences. The situation with the acceleration of electrons, which make the main contribution to the energy of the flare, is studied. It is supposed that the acceleration process occurs in an X-type magnetic peculiarity. The analysis of this process has shown that the main energy factor of a solar flare is the number of accelerating electrons. Changing flow of these electrons gives 4 orders of magnitude in energy. At the same time, it turned out that the cross-sectional area of the acceleration zone itself probably is not depended on the flare energy. The diameter of this section has a value of about 100 km.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-197-200

Введение

В активных областях Солнца происходят импульсные выделения энергии – солнечные вспышки. Минимальное количество выделяемой энергии $\sim 10^{27}$ эрг. Максимальная зарегистрированная величина составляет $3.6 \cdot 10^{32}$ эрг [1]. Взрывные процессы с меньшим энергетическим потенциалом происходят по всему Солнцу – это нановспышки. Чтобы понять причину столь значительного энергетического диапазона солнечных вспышек необходимо установить основные факторы, на него влияющие. И оценить возможный интервал изменения значений таких факторов.

Энергетические факторы вспышки

Энергия солнечной вспышки определяется, главным образом, количеством ускоренных до ≥ 100 кэВ электронов. Процесс ускорения происходит в двух хромосферных и корональном источниках. Основная энергия вспышки приходится на хромосферные источники. Тогда можно записать:

$$\mathcal{E}_f \approx 2 \int w_e (\partial N_e / \partial t) dt = 2 \langle w_e \rangle \langle \partial N_e / \partial t \rangle t_f, \quad (1)$$

где $\langle w_e \rangle$ – средняя энергия ускоренного электрона, $\langle \partial N_e / \partial t \rangle$ – средний поток электронов в зону ускорения, t_f – время импульсной фазы вспышки.

Оценку энергетических факторов (1) проведем в рамках авторской модели [2]. В этой модели процесс ускорения частиц плазмы совершается под действием вихревого электрического поля вдоль магнитной

Х-особенности. Ускорение электронов, в частности, ограничено возбуждением плазменной неустойчивости. Предельная величина набираемой энергии зависит от температуры в зоне ускорения [3]. В таком случае энергия электрона будет определяться средней температурой $\langle w_e \rangle = 3 \cdot 10^{-2} \langle T_e \rangle$ [эВ]. Согласно [4] для маломощных вспышек класса А температура $T_e \geq 0.8 \cdot 10^7$ К, а у самых мощных зарегистрирована $T_e \approx 4.5 \cdot 10^7$ К [5]. Тем самым вариация по энергии ускоренных электронов оказалось около 5 раз.

Наблюдаемая длительность импульсной фазы t_f (1), когда и происходит ускорение частиц, лежит в интервале 10–30 минут. Поскольку эффект солнечной вспышки связан с мезогрануляционной конвекцией [2], то величина импульсной фазы не может превышать времени жизни мезогранулы $\sim 10^3$ сек. Значит, ожидать продолжительность существенно большую $t_f > 30$ минут нет оснований. И вариация величины фактора t_f будет около 3.

С учетом вышесказанного, получаем интервал вариации потока электронов в зону ускорения $\langle \partial N_e / \partial t \rangle \approx 2 \cdot (10^{31} - 10^{35})$ электрон/сек.

Электронный поток

Электроны поступают в зону ускорения по силовым линиям с конфигурацией, показанной на рис. 1 изогнутыми линиями. Оказываясь в окрестности Х-особенности с размером D , где нарушаются условия замagnetиченности, электроны ускоряются вихревым электрическим полем [2]. Количество поступающих в эту зону ускорения электронов зависит от их скорости и окружающей плотности, а также протяженности области ускорения:

$$\langle \partial N_e / \partial t \rangle = \langle v_r \rangle \pi D \cdot 0.5 [n_e] dh = 0.5 \langle v_r \rangle \langle n_e \rangle \pi D \cdot H \quad (2)$$

где $\langle v_r \rangle$ – скорость, направленная к Х-особенности, $\langle n_e \rangle$ – средняя плотность вдоль области ускорения протяженностью H . Коэффициент 0.5 в выражении (2) означает, что количество электронов, движущихся к Х-особенности и от неё, одинаково.

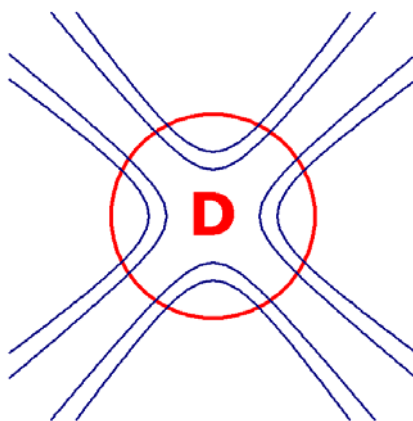


Рис. 1.

Направленная к X-особенности скорость представляет собой компоненту тепловой скорости v_k . Необходимо также учесть кривизну силовых линий (рис. 1). Тогда искомую направленную скорость можно записать как

$$\langle v_r \rangle = \langle v_k/3 \rangle \cdot \langle \cos \gamma \rangle, \quad (3)$$

где эффект кривизны силовых линий есть средняя величина проекции на радиальное направление $\langle \cos \gamma \rangle \approx 0.7$. В зоне ускорения, как было сказано выше, температура $\approx 10^7$ К, поэтому для мощных вспышек можно ожидать прогрева на значительное расстояние. И считать среднюю тепловую скорость, соответствующую этой температуре, $v_k \approx 10^9$ см/сек. Для слабых вспышек прогрев окружающей зону ускорения плазмы будет меньше. Средняя температура в таком случае может составить $\approx 10^5$ К (температура невозмущенной хромосферы $\sim 10^4$ К), что соответствует тепловой скорости $v_k \approx 10^8$ см/сек. С учетом сказанного направленная скорость электронов (3) будет лежать в пределах $\langle v_r \rangle \approx 2 \cdot (10^7 - 10^8)$ см/сек.

Ситуация со средней плотностью (2) зависит от положения области ускорения и её протяженности. При небольшой протяженности $\sim 10^2$ км и возможном расположении по всей высоте хромосферы диапазон $\langle n_e \rangle = 10^{10} - 10^{12}$ см $^{-3}$. В случае большей протяженности области ускорения средняя плотность будет около 10^{11} см $^{-3}$. Таким образом, этот интервал значений средней плотности следует считать вероятной вариацией для указанного фактора источника солнечной вспышки.

С учетом оценок возможного интервала изменений двух факторов $\langle n_e \rangle$ и $\langle v_r \rangle$ получаем из (2) величину внешней площади зоны ускорения $\pi D \cdot H$. Но тут надо понимать, что существует неопределенность с протяженностью области ускорения и её положением в хромосфере. Для мощных вспышек можно ожидать, что протяженность источника занимает всю хромосферу $H \approx 2 \cdot 10^3$ км. В этом случае средняя плотность $\langle n_e \rangle \approx 10^{11}$ см $^{-3}$ и скорость $\langle v_r \rangle \approx 2 \cdot 10^8$ см/сек. Тогда размер зоны ускорения $D \approx 300$ км.

Для слабых вспышек ожидаемая скорость $\langle v_r \rangle \approx 2 \cdot 10^7$ см/сек и плотность в установленном выше интервале $\langle n_e \rangle = 10^{10} - 10^{12}$ см $^{-3}$. При этом поток электронов $\langle \partial N_e / \partial t \rangle \approx 2 \cdot 10^{31}$ электрон/сек. В итоге имеем площадь области ускорения $\pi D \cdot H \approx 2 \cdot (10^{12} - 10^{14})$ см 2 . Протяженность H может быть на порядок меньше, чем для мощных вспышек, т.е. $H \sim 100$ км. В таком случае размер зоны ускорения $D \approx 30 - 0.3$ км. Вариант $D \approx 0.3$ км представляется маловероятным на фоне оценки $D \approx 300$ км для мощных вспышек. К тому же источник вспышки малой мощности не может находиться в верхней части хромосферы. Не исключен вариант очень небольшой $H \sim 10$ км протяженности источника слабой вспышки. В этом случае размер зоны ускорения оказывается независимым от энергии солнечной вспышки $D \approx 300$ км.

Выводы

Проведен анализ факторов, влияющих на энергию солнечной вспышки. Оказалось, что основной фактор – это величина потока электронов в зону ускорения. Вариация составляет 4 порядка.

Был проведен модельный расчет потока электронов в зону ускорения в предположении, что ускорение происходит вдоль магнитной X-особенности. Для мощных вспышек диаметр зоны ускорения составил около 300 км. Для слабых вспышек есть неопределенность по величине этого диаметра, которая зависит от протяженности области ускорения. Если эта протяженность ~ 10 км, то имеем размер зоны ускорения 300 км, независимый от энергии солнечной вспышки. Если протяженность будет на порядок меньше, чем у мощных вспышек ~ 100 км, тогда и диаметр зоны ускорения тоже будет на порядок меньше ≈ 30 км.

Литература

1. *Emslie A.G., Dennis B.R., Shih A.Y., et al.* // *Astrophys. J.*, 2012, v. 759, 71 (18pp).
2. *Мерзляков В.Л.* // Труды Всероссийской конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2020”, СПб, ГАО РАН, 2020, с. 209-212.
3. *Мерзляков В.Л.* // Труды Всероссийской конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2021”, СПб, ГАО РАН, 2021, с. 197-198.
4. *Кириченко А.С., Богачев С.А.* // *Письма в Астрон. Ж.*, 2013, т. 39, №11, с. 884-896.
5. *Warmuth A., Mann G.* // *Astron. and Asrtophys.*, 2016, v. 588, A115 (14pp).