

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОВОГО СЛОЯ И ТЕПЛОВОЙ ТРИГГЕР СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

С. И. СЫРОВАТСКИЙ

Параметры, характеризующие квазистационарный токовый слой в атмосфере Солнца, выражены через концентрацию окружающей плазмы, напряженность внешнего электрического поля и градиент магнитного поля в окрестности его нулевой линии последнего. Определены условия, при которых происходит срыв квазистационарного режима. Такой срыв можно отождествить с началом взрывной фазы солнечной вспышки.

CURRENT SHEET CHARACTERISTICS AND THERMAL TRIGGER OF SOLAR FLARES, by S. I. Syrovatskiĭ. Parameters characterizing the steady current sheet in solar atmosphere are expressed in terms of initial plasma density, electric field and gradient of the outer magnetic field near its zero line. Conditions are found, when the steady state breaks up. This can be identified with the onset of the explosive phase of a flare.

Наиболее вероятной причиной солнечных вспышек является быстрая перестройка токового слоя, развивающегося в хромосфере или в короне на нулевой линии магнитного поля (Сыроватский, 1966, 1969, 1971, 1975). Ниже приводятся зависимости между характерными параметрами стационарного токового слоя и показано, что при определенных условиях происходит срыв стационарного режима. Такой срыв можно отождествить с началом взрывной фазы солнечной вспышки.

Пусть h_0 — градиент внешнего (с источниками в фотосфере) магнитного поля в окрестности нулевой линии и E_0 — напряженность вызванного изменениями этих источников электрического поля вдоль нулевой линии; $2a$, $2b$ и l — толщина, ширина и длина токового слоя, n_0 и n_c — концентрация плазмы вблизи и внутри слоя;

$$V_d = cE_0/B_c, V_{A_0} = B_c/\sqrt{4\pi Mn_0} \text{ и } V_{A_c} = B_c/\sqrt{4\pi Mn_c}$$

— скорость дрейфа плазмы в слой и альвеновские скорости вне и внутри слоя; T_0 , T и $\sigma = \sigma_0 T^{3/2}$ — температура вне и внутри слоя и кулоновская проводимость в слое, $\sigma_0 = 1.4 \cdot 10^8/\lambda \text{ сек}^{-1} \text{ град}^{-3/2}$, λ — кулоновский логарифм, M — масса протонов.

Магнитное поле вблизи слоя равно (Сыроватский, 1969, 1971, 1975)

$$B_c = h_0 b = 2 (I h_0 / c)^{1/2}, \quad (1)$$

где I — полный ток в слое (в квазистационарном режиме обратные токи, допускаявшиеся в нашей ранней работе (Сыроватский, 1971), должны отсутствовать).

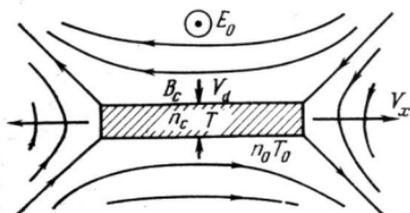


Рис. 1

Рис. 1. Токовый слой на нулевой линии магнитного поля

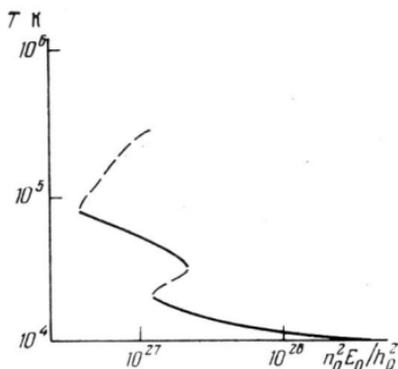


Рис. 2

Рис. 2. Кривая равновесной температуры слоя. Пунктиром показаны неустойчивые ветви

Для нахождения связи между параметрами стационарного токового слоя воспользуемся уравнениями непрерывности, импульса и законом Ома, из которых в условиях сильного поля ($V_{A_0}^2 \gg V_d^2, V_{A_0}^2 \gg kT_0/M$) вытекают следующие порядковые соотношения (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} n_0 V_d b &= n_c V_x a, \\ B_c^2 / 8\pi &= 2n_c kT, \\ Mn_c V_x^2 / 2 &= 2n_c kT, \\ \frac{cB_c}{4\pi a} &= \sigma E_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Отсюда следует, что скорость вытекания плазмы вдоль слоя (Свит, 1971)

$$V_x \equiv V_{A_c} = B_c / \sqrt{4\pi Mn_c}, \quad (3)$$

а остальные величины могут быть выражены через «внешние» параметры — n_0, h_0 и E_0 , которые предполагаются известными, и температуру слоя:

$$b = 4\pi (k\sigma_0^2 M / 4\pi^2)^{1/6} (n_0 E_0^2 T^2 / h_0^4)^{1/3}, \quad (4)$$

$$n_c = (\pi\sigma_0^2 M / 4k^2)^{1/3} (n_0 E_0^2 / h_0)^{2/3} T^{1/3}, \quad (5)$$

$$a = ch_0 b / 4\pi\sigma_0 T^{3/2} E_0. \quad (6)$$

Для определения температуры следует воспользоваться уравнением энергии. Нетрудно показать, что в условиях солнечной атмосферы перенос энергии из слоя потоком плазмы и теплопроводностью играют второстепенную роль, а главными являются приток магнитной энергии в слой и лучистое охлаждение слоя:

$$(B_c^2/4\pi) V_{db} = L(T) n_{c0}^2 ab. \quad (7)$$

Функция потерь на излучение $L(T)$ определена Коксом и Такером (1969). Из соотношений (4) — (7) вытекает следующее уравнение для определения температуры слоя:

$$T^{3/6} = \sigma_0^{1/3} \left(\frac{\pi M}{4k^2} \right)^{2/3} \left(\frac{n_0^2 E_0}{h_0^2} \right)^{2/3} L(T). \quad (8)$$

Графическое решение этого уравнения приведено на рис. 2, где пунктиром показаны неустойчивые ветви (на них малое отклонение температуры от равновесной ведет к росту этого отклонения со временем). Первому срыву при $T = 2 \cdot 10^4$ К, обусловленному излучением в линии L_α , едва ли следует придавать значение, так как функция $L(T)$ вычислена Коксом и Такером (1969) без учета поглощения излучения, которое существенно для водородных линий в атмосфере Солнца. Напротив, второй срыв при

$$T = 8 \cdot 10^4 \text{ и } n_0^2 E_0 / h_0^2 = 3.8 \cdot 10^{26} \quad (9)$$

обязательно существует из-за наличия максимума в $L(T)$ и асимптотического хода $L(T) \propto T^{1/2}$, более медленного, чем требуется для выполнения условия теплового баланса (8). В результате, при достижении критических значений (9), равновесие слоя становится невозможным: лучистые потери не могут сбалансировать джоулев нагрев и должен начаться быстрый разогрев слоя.

Такой срыв может произойти из-за уменьшения n_0 при выходе слоя в разреженную корону либо при уменьшении напряженности электрического поля E_0 , либо в результате других внешних воздействий («симпатические» вспышки), при которых величина параметра $n_0^2 E_0 / h_0^2$ падает ниже критического значения.

Быстрый разогрев слоя может привести к цепочке кинетических процессов в плазме: отрыву электронной температуры, развитию ионно-звуковой или бунемановской неустойчивости плазмы и переходу плазмы в турбулентное состояние. В реальных условиях слой неоднороден, и эти процессы начинаются там, где условие срыва осуществляется раньше всего. Такие места и служат местами «разрыва» слоя со всеми сопутствующими эффектами (Сыроватский, 1975).

В таблице приведены характерные параметры слоя в солнечной короне, находящегося на границе устойчивости (9). Заданы значения $n_0 = 5 \cdot 10^8$, $h_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ гс/см и $l = 10^{10}$ см.

Параметры предвспышечного токового слоя в короне

Параметр	Обозначение	Значение
Концентрация вне слоя	n_0	$5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$
Градиент внешнего магнитного поля	h_1	$5 \cdot 10^{-7} \text{ гс/см}$
Длина слоя	l	10^{10} см
Температура слоя	T	$8 \cdot 10^4 \text{ К}$
Электрическое поле	E_0	$4 \cdot 10^{-4} \text{ CGSE}$
Ширина слоя	b	$7 \cdot 10^8 \text{ см}$
Толщина слоя	a	10 см
Магнитное поле вблизи слоя	B_c	340 гс
Полный ток в слое	I	$6 \cdot 10^{11} \text{ а}$
Концентрация в слое	n_c	$2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$
Свободная энергия слоя	W	10^{32} эрг
Стационарная мощность	P	$8 \cdot 10^{27} \text{ эрг/сек}$
Время формирования слоя	t_1	$3 \cdot 10^4 \text{ сек}$
Длительность разрыва слоя	t_2	10^2 сек

Остальные значения получены из соотношений (1), (4–6), (9) и выражений для свободной энергии токового слоя (Сыроватский, 1975):

$$W = l \frac{h_0^2 b^4}{32} \ln \frac{4l^2}{b^2}, \quad (10)$$

стационарно выделяемой мощности:

$$P = \sigma E_0^2 4abl, \quad (11)$$

времени формирования слоя (Сыроватский, 1975):

$$t_1 = \frac{I}{c^2 E_0} \ln \frac{4l^2}{b^2} \quad (12)$$

и длительности взрывной фазы

$$t_2 = b/V_{Ac}. \quad (13)$$

Полученные значения согласуются с наблюдательными оценками величин полей и полного тока перед сильными вспышками (Зверева и Северный, 1970).

Физический ин-т им. П. Н. Лебедева
АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
13 ноября 1975 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Зверева А. М. и Северный А. Б., 1970. Изв. Крымск. астрофиз. обсерв., 41, 97.
 Кох и Такер (Cox D. P., Tucker W. H.), 1969. Astrophys. J., 156, 787.
 Свит (Sweet P. A.), 1958. Proc. IAU Symp. No. 6, «Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics», 123.
 Сыроватский С. И., 1966. Астрон. ж., 43, 340.
 Сыроватский С. И., 1969. В сб.: Solar Flares and Space Research, Eds. C. de Jager and Z. Svestka, Amsterdam, North-Holland, 346.
 Сыроватский С. И., 1971. ЖЭТФ, 60, 1727.
 Сыроватский С. И., 1975. Изв. АН СССР, сер. физ., 39, 359.