

ТЕПЛОЙ ТРИГГЕР СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Л.С. Леденцов

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
leonid.ledentsov@gmail.com

THERMAL TRIGGER FOR SOLAR FLARES

L.S. Ledentsov

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia
leonid.ledentsov@gmail.com

Аннотация. Мы рассматриваем тепловую устойчивость трех кусочно-однородных моделей предвспышечного токового слоя (ТС): нейтрального ТС, ТС с направляющим магнитным полем и ТС с наклонной фрагментацией. Решение задачи во всех случаях допускает образование неустойчивости тепловой природы. Неустойчивость приводит к фрагментации ТС с пространственным периодом 1–10 Мм вдоль направления тока в широком диапазоне параметров корональной плазмы. Результат может объяснить наблюдаемые пространственные периоды в энерговыделении солнечных вспышек.

Ключевые слова: магнитное пересоединение, тепловая неустойчивость, модель вспышки.

Abstract. We consider the thermal stability of three piecewise homogeneous models of the preflare current layer: a neutral current layer, a current layer with the guiding magnetic field, and a current layer with oblique fragmentation. Solution to the problem allows for the formation of an instability of thermal nature in all cases. The instability results in fragmentation of the current layer with a spatial period of 1–10 Mm along the current direction in a wide range of coronal plasma parameters. The result can explain the observed spatial periods of energy release in solar flares.

Keywords: magnetic reconnection, thermal instability, flare model.

ВВЕДЕНИЕ

Энергия солнечной вспышки накапливается в процессе формирования предвспышечного токового слоя над аркадой магнитных петель в виде непотенциальной энергии магнитного поля токового слоя (ТС) [Сомов, 2013]. Наличие отдельных ярких петель во вспышечной аркаде, наблюдаемой в ультрафиолетовом диапазоне, говорит о том, что первичное выделение энергии в солнечной вспышке происходит пространственно неоднородно [Benz, 2017]. Следовательно, должен существовать механизм, приводящий к квазипериодическому разрушению предвспышечного ТС в направлении распространения тока [Zimovets et al., 2021]. Мы полагаем, что описанная фрагментация предвспышечного ТС связана с нарушением его теплового баланса [Field, 1965].

НЕЙТРАЛЬНЫЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ

Следуя [Сомов, Сыроватский, 1982], рассмотрим кусочно-однородную модель предвспышечного ТС, которая состоит из плазмы ТС и окружающей плазмы, разделенных тангенциальным разрывом (рис. 1).

Окружающая плазма считается идеальной, а внутри слоя учитываются все диссипативные эффекты: конечная тепло- и электропроводность, вязкость, радиационное охлаждение. Вначале будем считать, что ТС тонкий ($b \gg a$, $\partial/\partial x = 0$) и внутри него нет невозмущенного магнитного поля. В этих условиях решаем задачу малых возмущений в приближении диссипативной магнитогидродинамики [Сомов, 2012]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n\mathbf{v}) = 0,$$

$$\mu\eta \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla(2nkT) -$$

$$-\frac{1}{4\pi}(\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \mathbf{B}) + \eta \Delta \mathbf{v} + \nu \nabla \operatorname{div} \mathbf{v},$$

$$\frac{2nk}{\gamma-1} \frac{dT}{dt} - 2kT \frac{dn}{dt} = \frac{c^2}{(4\pi)^2 \sigma} (\operatorname{rot} \mathbf{B})^2 +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial r_\alpha} (\sigma_{\alpha\beta} v_\beta) + \operatorname{div}(\kappa \nabla T) - \lambda(n, T),$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \operatorname{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \frac{c^2}{4\pi} \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \mathbf{B} \right),$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Здесь $\mu = 1.44m_{\text{H}}$, где m_{H} — масса атома водорода; k — постоянная Больцмана; γ — показатель адиабаты; κ , σ — тепло- и электропроводность плазмы; $\lambda(n, T)$ — функция лучистого охлаждения; η , ν — коэффициенты вязкости; $\sigma_{\alpha\beta}$ — тензор вязких напряжений; T , n , \mathbf{v} — температура, концентрация и скорость плазмы; \mathbf{B} — напряженность магнитного поля.

Мы обнаружили неустойчивость ТС тепловой природы [Леденцов, 2021a]. Неустойчивость обусловлена возможностью проникновения внешнего магнитного поля внутрь ТС при возмущении расположенных на его границе экранирующих токов. На линейной фазе роста инкремент неустойчивости Γ обратно пропорционален характерному времени радиационного охлаждения плазмы τ_λ :

$$\Gamma = \frac{2\beta - \alpha}{5\tau_\lambda},$$

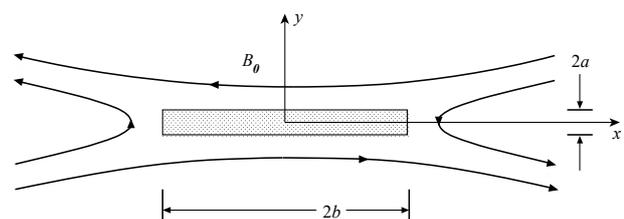


Рис. 1. Модель нейтрального токового слоя

где α , β — логарифмические производные функции лучистого охлаждения λ по температуре T и плотности n внутри токового слоя:

$$\alpha = \frac{\partial \ln \lambda}{\partial \ln T}, \beta = \frac{\partial \ln \lambda}{\partial \ln n}.$$

Пространственный период неустойчивости l приведен на рис. 2 и составляет 1–10 Мм в ожидаемом диапазоне температур предвспышечного ТС ($3 \cdot 10^6$ – 10^7 К).

ТОКОВЫЙ СЛОЙ С НАПРАВЛЯЮЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ И НАКЛОННОЙ ФРАГМЕНТАЦИЕЙ

Мы показали, что наличие слабого продольного поля (B_z на рис. 3, а) не меняет пространственного периода тепловой неустойчивости в наиболее разумном диапазоне параметров предвспышечного ТС (рис. 4, а). Более того, оно способствует формированию неустойчивости, подавляя электронную теплопроводность внутри слоя [Леденцов, 2021б]. С другой стороны, сильное продольное магнитное поле обеспечивает пространственную стабилизацию ТС.

Мы показали также, что фрагментация поперек тока (k_z на рис. 3, б) является естественным свойством рассматриваемой модели предвспышечного ТС [Леденцов, 2021в]. Отклонение фрагментации от поперечной не превышает нескольких градусов для реалистичных параметров корональной плазмы.

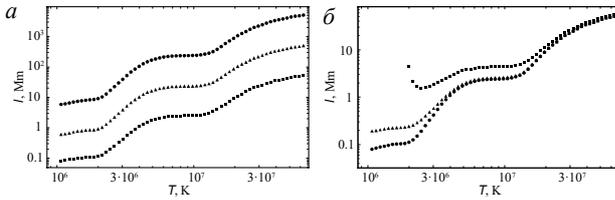


Рис. 2. Пространственный период неустойчивости l в зависимости от температуры токового слоя T . Концентрация плазмы корональной n_0 и токового слоя n_s ; $n_0=10^{10} \text{ см}^{-3}$, $n_s/n_0=10$. Меняется один из параметров: а — $n_0=10^8 \text{ см}^{-3}$ (кружки); $n_0=10^9 \text{ см}^{-3}$ (треугольники); $n_0=10^{10} \text{ см}^{-3}$ (квадраты); б — $n_s/n_0=10$ (кружки); $n_s/n_0=100$ (треугольники); $n_s/n_0=1000$ (квадраты)

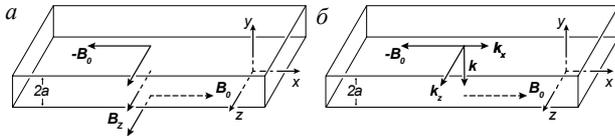


Рис. 3. Модели ТС с направляющим магнитным полем (а) и с наклонной фрагментацией (б)

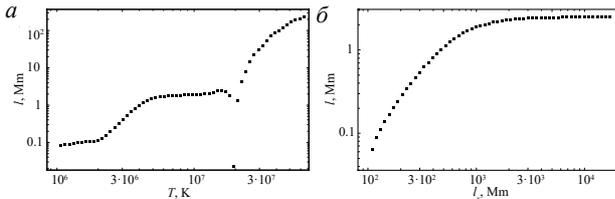


Рис. 4. Пространственный период неустойчивости l в зависимости от температуры токового слоя T для концентраций $n_0=10^{10} \text{ см}^{-3}$, $n_s/n_0=10$ и продольного магнитного поля $B_z=10^{-3} \text{ Гс}$ (а); соотношение между пространственными масштабами неустойчивости l_x и l (б)

Наклонная фрагментация, как правило, не оказывает сильного влияния на результаты моделирования, однако при экстремальных изменениях пространственный масштаб неустойчивости может уменьшаться на порядок до 0.1–1 Мм (рис. 4, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено влияние нарушения теплового баланса на структурную устойчивость предвспышечного токового слоя. Неустойчивость теплового характера приводит к фрагментации ТС с пространственным периодом 1–10 Мм вдоль направления тока. Сильное продольное поле внутри слоя приводит к пространственной стабилизации неустойчивости, в то время как слабое поле способствует ее формированию. Фрагментация ТС поперек направления тока является естественным свойством рассмотренной модели.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00879, [<https://rscf.ru/project/22-22-00879>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Benz A.O. Flare observations. *Living Rev. in Solar Phys.* 2017. Vol. 14, iss. 1. Article id. 2. 59 p.
- Field G.B. Thermal instability. *Astrophys. J.* 1965. Vol. 142. P. 531.
- Ledentsov L. Thermal trigger for solar flares I: Fragmentation of the preflare current layer. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, iss. 4. Article id. 74. DOI: [10.1007/s11207-021-01817-1](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01817-1).
- Ledentsov L. Thermal Trigger for Solar Flares II: Effect of the Guide Magnetic Field. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, iss. 6. Article id. 93. DOI: [10.1007/s11207-021-01840-2](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01840-2).
- Ledentsov L. Thermal Trigger for Solar Flares III: Effect of the Oblique Layer Fragmentation. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, iss. 8. Article id. 117. DOI: [10.1007/s11207-021-01862-w](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01862-w).
- Somov B.V. *Plasma Astrophysics. Part I: Fundamentals and Practice.* 2nd Ed. ASSL, Vol. 391. New York: Springer Science+Business Media, 2012.
- Somov B.V. *Plasma Astrophysics. Part II: Reconnection and Flares.* 2nd Ed. ASSL, Vol. 392. New York: Springer Science+Business Media, 2013.
- Somov B.V., Syrovatskii S.I. Thermal trigger for solar flares and coronal loops formation. *Solar Phys.* 1982. Vol. 75. P. 237.
- Zimovets I.V., McLaughlin J.A., Srivastava A.K., et al. Quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares: a review of underpinning physical mechanisms and their predicted observational signatures. *Space Sci. Rev.* 2021. Vol. 217, no. 66. URL: <https://rscf.ru/project/22-22-00879>.