ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ АНОМАЛЬНОГО ПРОГРЕВА СОЛНЕЧНОЙ ХРОМОСФЕРЫ В ЭПОХУ МИНИМУМА АКТИВНОСТИ ЦИКЛА

Романов К.В.

*Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева,
г. Красноярск, Россия*

PHYSICAL MECHANISM OF ANOMAL HEATING OF THE SOLAR CHROMOSPHERE AT THE MINIMUM ACTIVITY OF THE CYCLE

Romanov K.V.

Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafyev, Krasnoyarsk, Russia

The article studies the generation of a stable wave flux at the photospheric level by the oscillations of large-scale magnetic fields in the upper layers of the convective zone of the Sun. The generated weak shock waves provide an anomalous heating of the solar chromosphere in the age of minimal cycle activity.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-335-338

1. Введение

Проблема аномального прогрева солнечной хромосферы относится к числу фундаментальных физических задач по исследованию активного Солнца, изучаемых в наблюдательных данных и в теоретических исследованиях [1, 2] вплоть до настоящего времени.

Наиболее интересна задача изучения феномена аномального прогрева солнечной атмосферы в эпоху минимума активности Солнца. По данным наблюдений аномальный прогрев характеризуется высокой степенью однородности вдоль солнечной поверхности и устойчивостью структуры прогрева в течение длительного времени [3].

В настоящей работе исследуется физический механизм генерации устойчивого волнового потока на фотосферном уровне колебаниями крупномасштабных магнитных полей в конвективной зоне Солнца [5]. Колебания магнитного поля генерируют поток слабых ударных волн, обеспечивающих феномен аномального прогрева солнечной хромосферы [5]. Изучаются особенности механизма генерации волнового потока, обеспечивающие устойчивость и однородность структуры аномального прогрева солнечной хромосферы в эпоху минимума активности цикла.

2. Результаты расчётов

На рис. 1,2 представлены результаты расчёта нелинейной фазы развития неустойчивости Паркера для магнитной трубки, расположенной в экваториальной плоскости Солнца, со следующими начальными параметрами:

волновое число $m = 4$, напряжённость магнитного поля $H_0 = 2 \cdot 10^6$ Гс. Для модели внутреннего строения Солнца из работы [4] глубина потери устойчивости $h = -188000$ км от фотосферного уровня.

Рис. 1. Всплытие магнитной трубки к фотосферному уровню (экваториальная плоскость Солнца, стадия подъёма, время подъёма 3.2 часа. Начальные данные: $H_0 = 2 \cdot 10^6$ Гс, $m = 4$).

Рис. 2. Нелинейные колебания верхней части арочной структуры вблизи фотосферного уровня (экваториальная плоскость Солнца, стадия опускания, время опускания 2.3 часа. Начальные данные: $H_0 = 2 \cdot 10^6$ Гс, $m = 4$).

При развитии неустойчивости Паркера реализуются квазигармонические колебания верхней части всплывающей арочной структуры магнитного поля вблизи фотосферного уровня. Установление устойчивого колебательного процесса реализуется в два этапа:

1. Полное развёртывание арочной структуры магнитного поля до стадии полного торможения за счёт натяжений магнитных линий в верхних слоях конвективной зоны (рис. 1).

2. Опускание верхней части арочной структуры до нижней точки полного торможения (рис. 2).

Далее верхняя часть арки магнитного поля совершает устойчивые квазигармонические колебания в диапазоне глубин (CD) (рис. 3). Колебания реализуются в потенциальной яме (рис. 3), минимум которой расположен на глубине -21000 км ниже фотосферного уровня. Колебания магнитного поля реализуются в дозвуковом режиме (рис. 4) и генерируют слабые ударные волны, распространяющиеся через фотосферный уровень в солнечную атмосферу.

Колебания тонких магнитных трубок вблизи фотосферного уровня служат источником слабых ударных волн, диссипация энергии которых разогревает нижние слои солнечной атмосферы, в устойчивом режиме.

На рис. 5–6 приведены распределения глубины срыва магнитного поля (h_{cr}), глубины достижения максимальной скорости подъёма (h_{vmax}), глубины достижения максимальной скорости подъёма в числах Маха ($h_{vmax}(M)$),

глубины торможения магнитной трубки ($h_{\min}$) в зависимости от начальной напряжённости магнитного поля в момент срыва (H_{cr} (Gs)) в спектральном диапазоне $1 \leq m \leq 4$. Главной замечательной особенностью представленных распределений является неизменность выделенных параметров при изменении начальной напряжённости в широком диапазоне значений: $0 \leq H_{\text{cr}} \leq 2 \cdot 10^6$ (Gs).

Рис. 3. Распределение удельной потенциальной энергии от глубины.

Рис. 4. Формирование устойчивых квазигармонических колебаний магнитной трубки вблизи фотосферного уровня.

Рис. 5. Глубина торможения ($h_{\min}$), глубина максимальной скорости подъёма ($h_{v_{\max}}$), глубина максимальной скорости подъёма в числах Маха ($h_{v_{\max}}(M)$), глубина потери устойчивости трубки (h_{cr}) в зависимости от напряжённости магнитного поля H_{cr} (Gs) при $m=1$, $m=4$.

Заключение

В эпоху минимума активности цикла атмосфера Солнца имеет стабильную пространственную форму. Эффект аномального прогрева по наблюдательным данным стабильно реализуется [2, 5] и по результатам настоящей работы объясняется следующим образом. Магнитные поля с малыми значениями напряжённости стабильно неустойчивы в нижних слоях конвективной зоны за счёт диффузии из верхних слоёв зоны лучистого переноса [5]. Критические значения напряжённости поля для развития неустойчивости Паркера стабильны (рис. 5, 6) и от напряжённости магнитного поля практически не зависят. Сброс магнитных полей при развитии неустойчивости Паркера в спектральном диапазоне $1 < m < 4$ ($\lambda > 10^6$ км) обеспечивает стабильный прогрев солнечной атмосферы с высокой степенью однородности вдоль солнечной поверхности в эпоху минимума активности цикла. Поскольку генерируются слабые ударные волны мощность аномального прогрева небольшая, размеры аномально прогретой солнечной хромосферы невелики.

Литература

1. Zaitsev V.V., Urpo S., Stepanov A.V. Temporal dynamics of Joule heating and DC-electric field acceleration in single flare loop // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 357. № 3. p. 1105–1114.
2. Abbett W.P. The Magnetic Connection between the Convection Zone and Corona in the Quiet Sun // *Astrophys. J.* 2007. V. 665. P. 1469–1488.
3. Priest E.R. *Solar Magnitohydrodynamics* – Boston Reidel. 1982. 430 p.
4. Christensen-Dalsgaard J., Dappen W., Ajukov S.V., etc. The current state of Solar modeling // *Science*. 1996. V. 272. P. 1286.
5. Alekseenko S.V., Mezentsev A.V., Romanov V.A., Romanov D.V., Romanov K.V. Stabilization of emerging magnetic field in the upper layers of the Solar convective zone // *Rus. J. Eng. Thermophys.* 1998. V. 8. № 1–4. P. 109–119.