ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДВСПЫШЕЧНОГО СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ СОЛНЕЧНОЙ ХРОМОСФЕРЫ

**Романов Д.В.¹, Романов К.В.¹, Романов В.А.²,
Еселевич В.Г.³, Еселевич М.В.³**

¹*Красноярский государственный педагогический университет, Красноярск, Россия*

²*Саратовский государственный университет, Саратов, Россия*

³*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

FORMATION OF A PRE-FLARE SIGNAL IN THE SOLAR CHROMOSPHERE

**Romanov D.V.¹, Romanov K.V.¹, Romanov V.A.²,
Eselevich V.G.³, Eselevich M.V.³**

¹*Krasnoyarsk state pedagogical University, Krasnoyarsk, Russia*

²*Saratov state University, Saratov, Russia*

³*Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

The paper investigates the development of Parker instability in the short-wave part of the vibration spectrum of large-scale magnetic fields (wave number $m = 20$) in the upper layers of the solar convective zone. Due to the sharp nonlinearity of the rise, a pointed needle-shaped profile is formed in the upper part of the magnetic arch, penetrating the solar chromosphere at hypersonic speed. The chromosphere experience a sharp vertical shock, generating a train of circular shock waves diverging along the solar surface, which are available for observation.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-337-340

1. Введение

Вспышки на Солнце являются самым мощным проявлением феномена солнечной активности [1]. Вспышки являются сложным объектом для анализа физических процессов, протекающих на различных стадиях реализации данного феномена. Исследования по вспышкам, реализуемые в рамках международной программы по изучению солнечно-земных связей, с практической стороны охватывают широкий круг задач, начиная с проблем практической космонавтики до проблем общего земного здравоохранения [1]. Исходным пунктом решения поставленных задач является предвспышечная диагностика зарождения активных областей на Солнце: выделение физического процесса (сигнала), предшествующего реализации вспышки в активной области. Такие сигналы получили название «предвестники». Нахождению «предвестников», изучению их физической природы посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ [1, 2]. Проблема остаётся открытой до настоящего времени: не найден надёжный физический критерий или явление, отражающие физическую природу начала вспышечного процесса, и позволяющие уверенно диагно-

стировать предвспышечную ситуацию в развивающихся активных областях атмосферы Солнца [1, 4].

В настоящей работе исследуется динамика подъёма магнитных полей из верхних слоёв конвективной зоны в солнечную атмосферу с реализацией взрывных режимов – режимов «нелинейного обострения» подъёма магнитного поля. Методом математического моделирования в работе детально изучается динамика подъёма магнитного поля от фотосферного уровня до верхних слоёв хромосферы Солнца. Результаты расчётов допускают прямое сопоставление с наблюдательными данными по генерации сильных концентрических ударных волн, распространяющихся в солнечной атмосфере в очагах вспышечной активности [5].

2. Результаты расчётов

В работе исследуется динамика движения тонкой магнитной трубки, замкнутой в кольцо, и расположенной в экваториальной плоскости Солнца. Число стоячих волн, укладывающихся по периметру трубки, называется волновым числом m . Вблизи положения равновесия реализуются два типа линейных колебаний магнитной трубки: изгибные (быстрые) и варикозные (медленные) волны [3].

В работе исследуется нелинейная фаза развития неустойчивости медленной волны колебаний магнитной трубки: при достаточно слабых магнитных полях области сгущения газа под действием силы тяжести начинают тонуть. Газ из области разрежения стекает вниз в области сгущения, более легкие сегменты трубки под действием силы Архимеда всплывают в атмосферу Солнца. Данный тип неустойчивости магнитных полей выделен Паркером и носит его имя [2]. При всплывании арочной магнитной структуры в солнечную атмосферу все участки магнитной трубки равноправны: с одной стороны газ втекает в некоторый объём, с другой стороны вытекает из этого объёма. Кроме самой верхней точки арочной магнитной структуры – в объёме, содержащем эту точку, плазма вытекает через оба боковых сечения и создаются наиболее благоприятные условия для развития неустойчивости Паркера. Скорость подъёма верхней части арочной магнитной структуры нелинейно растёт. Вершина магнитной арки заостряется и принимает иглообразную форму. Чем остриё «иглы» тоньше, тем лучше газ стекает вниз под действием силы тяжести и лучше развивается неустойчивость Паркера.

В коротковолновом диапазоне для гармоники $m = 20$ глубина срыва магнитного поля равна 52394 км ниже фотосферного уровня. Несмотря на небольшую глубину погружения трубки по сравнению с длиной волны ($\lambda \approx 2 \cdot 10^5$ км) в нелинейной фазе развития неустойчивости Паркера верхняя точка всплывающей арочной магнитной структуры успевает набрать вертикальное ускорение порядка 600 м/сек^2 на фотосферном уровне. При этом скорость подъёма порядка 200 км/сек (рис. 1).

Рис. 1. Распределения вертикального и горизонтального ускорений магнитной трубки в момент выхода на фотосферный уровень (а); вертикальной скорости подъёма магнитной трубки при выходе на фотосферный уровень и в хромосферу (б).

Рис. 2. Распределения вертикального ускорения магнитной трубки в верхних слоях хромосферы (а); вертикального ускорения верхней точки арочной структуры в зависимости от высоты подъёма (б)

В верхних слоях хромосферы Солнца реализуется взрывной характер развития неустойчивости Паркера. Вертикальное ускорение подъёма почти на два порядка превышает ускорение свободного падения на поверхности Солнца (рис. 2а). Полуширина распределения графика вертикального ускорения резко снижается до значений $\Delta \approx 10^3$ км. Вертикальная скорость подъёма возрастает до значений порядка 300 км/сек (рис. 1), что на порядок превышает значения местной скорости звука ($M \approx 12$).

В верхних слоях хромосферы Солнца на высотах порядка 2000 км от фотосферного уровня реализуется нелинейный рост температуры из-за эффекта аномального прогрева солнечной атмосферы [4]. На эти высотах плотность газа в атмосфере резко падает, выталкивающая сила Архимеда исчезает, и трубка тормозится в режиме свободного падения в поле тяжести Солнца (рис. 2).

3. Заключение

В результате нелинейного роста скорости подъёма верхней части всплывающей арочной магнитной структуры при развитии неустойчивости Паркера фотосферные и хромосферные слои испытывают резкий вертикальный удар. Сила удара пропорциональна вертикальному ускорению всплывающей верхней части магнитной арки (рис.2а). Полуширина профиля порядка 1000 км. Горизонтальное ускорение практически отсутствует (рис.1а). При достижении фотосферного уровня трубка успевает разогнаться до гиперзвуковой скорости подъёма (рис.1б). В результате фотосфера и особенно хромосфера испытывают мощный резкий вертикальный удар, сконцентрированный на малой площади и производимый заостренным телом, движущимся с гиперзвуковой скоростью. От места воздействия удара отходят сильные концентрические ударные волны, распространяющиеся вдоль солнечной поверхности.

Рис. 3. Генерация концентрических ударных волн в солнечной хромосфере.

Эти волны, распространяющиеся при развитии активных областей, современными наблюдательными средствами уверенно регистрируются (рис.3) и получили название «солнцетрясение» [5]. Предложенный в настоящей работе механизм генерации ударных волн работает при выбросе магнитного поля и в чистую атмосферу вне активных областей. Этот вывод допускает прямую наблюдательную проверку. Главный результат работы: момент начала генерации концентрических ударных волн предшествует началу генерации солнечных вспышек в активной области. Это явление по своей физической сути является «предвестником».

Литература

1. *Зирин Г.* Солнечная атмосфера. – М.: Мир. 1969. – 504 с.
2. *Паркер Е.М.* Космические магнитные поля. Их образование и проявления // М.: Мир. 1982. Т. 1. 608 с. Т.2. 408 с.
3. *Romanov K.V.* The Effect of Heat Conduction on the Formation of Coronal Condensations in the Solar Atmosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, Vol. 58, No. 8, pp. 1123–1128.
4. *Прист Э.Р.* Солнечная магнитогидродинамика. – М.: Мир. 1985. – 592 с.
5. *Kosovichev A.G., Zharkova V.V.* Observation of seismic effects of solar flare from the Soho Michelson Doppler images // 1995, *Helioseismology*, Proc.4th SOHO Workshop, 341.