

## ASTROFİZİKA

УДК:523.7

## О ПРИРОДЕ ВОЛН МОРЕТОНА В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА

Д.М.КУЛИ-ЗАДЕ\*, С.Г.МАМЕДОВ\*\*\*,  
Н.С.ДЖАЛИЛОВ\*\*\*, А.А.ПЕВЦОВ\*\*  
*skulizade@mail.ru*

\* *Бакинский Государственный Университет*

\*\* *Национальная солнечная обсерватория США*

\*\*\* *Шемахинская астрофизическая обсерватория*

*Показано, что волна Моретона не может распространяться в короне, так как время охлаждения коронального газа до температуры 10000K на порядок превышает период волны. Утверждается, что волна Моретона не является ударной волной, так как наблюдаемый профиль фронта не имеет характерного разрыва для случая ударной волны. Кроме того, обоснуется, что волна Моретона не может являться гравитационной волной*

**Ключевые слова:** Солнце, волны Моретона, природа волн.

Эта работа является аналитическим продолжением предыдущей работы авторов [1]. Полный обзор работ о характере и природе волн Моретона в атмосфере Солнца можно найти в [2-17]. Там же приведена краткая история исследования волн Моретона в атмосфере. В данной работе обсуждается вопрос о природе волн Моретона. На основе проведенных расчетов утверждается, что волна Моретона не может быть корональной волной. Кроме того показывается, что волны Моретона не являются ударной и гравитационной волнами.

**Может ли волна Моретона быть корональной волной**

Поскольку волны Моретона видны в линии  $H_{\alpha}$ , то, очевидно, что на фронте волны корональная плазма должна охлаждаться до значения температуры  $\sim 10^4$  K. Допустим, что длина волны Моретона  $\sim 80\,000$  км. При прохождении передней четверти волны корональная плазма должна охлаждаться до значения  $\sim 10^4$  K. Если учесть, что скорость распространения волны  $\sim 1000$  км/с, то можно заключить, что корональная плазма на фронте волны должна охлаждаться в течение  $\sim 20$  секунд.

Вычислим время охлаждения корональной плазмы от  $T=10^6$  К до  $T=10^4$  К, принимая во внимание только охлаждение путем излучения. Ясно, что найденное таким образом время охлаждения представляет собой минимальное, так как одновременно с процессом охлаждения имеет место и нагрев короны путем излучения.

Количество тепловой энергии единицы объема корональной плазмы может определяться формулой

$$\varepsilon_0 = \frac{3}{2} n_0 k T_0.$$

Здесь  $n_0=10^9$  - концентрация невозмущенной короны,  $T_0=10^6$ К температура короны,  $k$ -постоянная Больцмана.

Время охлаждения корональной плазмы от  $T_0$  до  $T_1$ , можно определить по формуле

$$\Delta t_1 = \frac{\frac{3}{2} n_0 k (T_0 - T_1)}{n_0^2 \left( \frac{f(T_0) + f(T_1)}{2} \right)} = \frac{3}{2} k \frac{T_0 - T_1}{n_0 \left( \frac{f(T_0) + f(T_1)}{2} \right)}, \quad (1)$$

где  $f(T)$ - функция излучения Кокса-Такера. Здесь величина

$$\frac{f(T_0) + f(T_1)}{2}$$

представляет собой среднее значение излучения плазмы при температурах  $T_0$  и  $T_1$ .

В процессе охлаждения плотность плазмы короны будет увеличиваться. При этом плотность для каждой температуры можно найти из баланса внутреннего  $p_i$  и внешнего  $p_e$  давлений:

$$p_i = n(T_i) k T_i = p_e = n(T_0) k T_0. \quad (2)$$

Отсюда находим:

$$n(T_i) = \frac{T_0}{T_i} n_0(T_0). \quad (3)$$

Поставив это в (1), получим

$$\Delta t_1 = \frac{3}{2} k \left( \frac{T_0 - T_1}{\frac{T_0}{T_1} n_0(T_0) \left( \frac{f(T_0) + f(T_1)}{2} \right)} \right). \quad (4)$$

В общей форме (4) можно переписать в виде

$$t_i = \frac{3}{2} k \frac{T_i - T_{i+1}}{\frac{T_0}{T_{i+1}} n_0(T_0) \left( \frac{f(T_i) + f(T_{i+1})}{2} \right)}. \quad (5)$$

Суммируя все эти времена, находим полное время охлаждения корональной плазмы от  $T_0=10^6$ К до  $T_N=10^4$ К, при которой излучается линия  $H\alpha$ :

$$t = \left(\frac{3}{2}\right) k \sum_{i=1}^N \frac{T_i - T_{i+1}}{\frac{T_0}{T_i} n_0(T_0) \left(\frac{f(T_i) + f(T_{i+1})}{2}\right)}. \quad (6)$$

При расчете времени охлаждения  $t$ , функция Кокса-Такера между значениями  $T=10^6$  К и  $T=10^4$  К была разделена на 20 равных частей. Время охлаждения  $t_i$  было рассчитано для каждого интервала температуры. Суммирование всех  $t_i$  дало значение  $t \sim 260$  с. Как видим, это на порядок больше времени охлаждения для случая распространения волны Моретона в корональных слоях ( $\sim 20$  с). Таким образом, мы приходим к заключению, что эта волна не может распространяться в короне, так как время прохождения четверти волны на порядок меньше времени охлаждения корональной плазмы до температуры излучения линии  $H\alpha$ . Кроме того если бы волна Моретона распространялась в короне, то она наблюдалась бы над лимбом, чего на самом деле не имеет места.

### **Почему волна Моретона не наблюдается над лимбом диска Солнца?**

Если волна Моретона распространяется в хромосфере (даже в верхней хромосфере), как утверждают все исследователи, то она должна была бы наблюдаться над лимбом как эмиссионное образование в линии  $H\alpha$ . Однако, эти волны над лимбом не наблюдались, хотя в некоторых случаях очень хорошо видно, как волна на диске приближается к лимбу, пересекает лимб, переходит в другую, не видимую сторону Солнца [2-7].

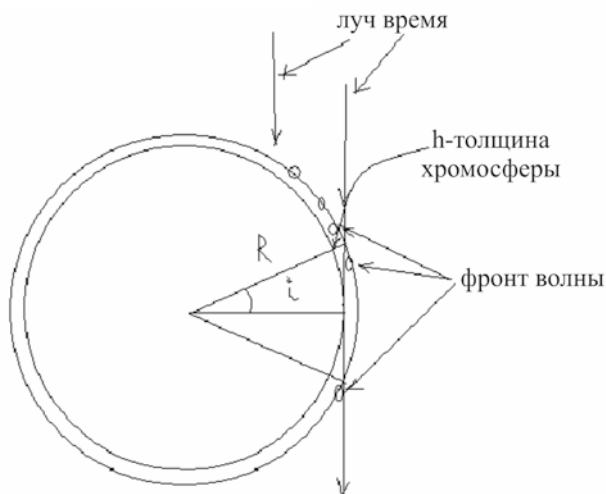
Проверим возможность наблюдения фронта волны Моретона на лимбе. Дело в том, что из-за огромной фазовой скорости (порядка 1000-2000 км/с) волна быстро может проскочить область видимости на лимбе и вследствие ограниченности частоты съемки наблюдатель не «поймает» ее.

На рис.1. 1-луч зрения, 2- луч зрения, касательная к лимбу, 3- область видимости волны на лимбе, 4- фронт волны на некоторой высоте  $h$ . В данном случае фронт волны движется сверху вниз по указанной дуге. Очевидно, что волна на лимбе будет видна когда она находится на участке дуги между точками пересечения ее с лучом зрения, касательной к лимбу. Это – область видимости волны на диске.

Найдем угол  $\alpha$  дугу на поверхности Солнца, по которому движется фронт волны в области ее видимости на лимбе. Задача заключается в том, чтобы найти длину этой дуги, далее найти промежуток времени прохождения волны на этой дуге и сравнить его с частотой съемки, точнее с промежутком времени между двумя последовательными съемками.

Из рис. 1 имеем:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{R}{R+h}.$$



**Рис. 1.** К расчету времени прохождения волны Моретона в зоне видимости на лимбе

Тогда промежуток времени, в течение которого фронт волны проходит зону ее видимости на лимбе, будет:

$$\Delta t = \frac{2\pi R}{360} \frac{\alpha}{v} = \frac{\pi R}{360v} \arccos\left(\frac{R}{R+h}\right)$$

Расчет по этому выражению показывает, что при изменении высоты распространения волны Моретона  $h$  от 10 000 км до 2000 км и скорости распространения  $v$  от 1000 км/с до 2000 км/с время прохождения видимости  $\Delta t$  изменяется от 234с до 52с,

Частота съемок при наблюдениях обычно бывает три кадра в минуту- два кадра в крыльях и один кадр в центре линии. Таким образом, вовремя прохождения волны над лимбом ее можно регистрировать 9 раз. Если же взять максимальную скорость волны 2000 км/с, то волну можно «поймать» 3 раза.

Мы приходим к заключению, что если бы волна находилась верхней хромосфере и даже в слоях нижней хромосферы, то ее давно наблюдали бы солнечные наблюдатели над краем диска как яркое образование.

По наблюдениям [9], EIT – волны, наблюдаемые в корональных линиях, отсутствуют в линии  $L_{\alpha}$ , которая возникает в верхней хромосфере. Кроме того, показано, что EIT- волны также не наблюдаются в линиях переходной зоны хромосфера – корона. Эти наблюдательные факты говорят о том, что EIT- волны не проникают ни в верхнюю хромосферу, ни в переходную зону хромосфера–корона.

### Может ли волна Моретона быть ударной волной?

Некоторые исследователи считают, что волна Моретона является ускоренной ударной волной [3, 6]. На основании реальных соображений можно твердо утверждать, что волна Моретона не является ударной волной. На рис. 2 показан схематический контур фронта ударной волны, а на рис. 3 схематический контур волны Моретона.

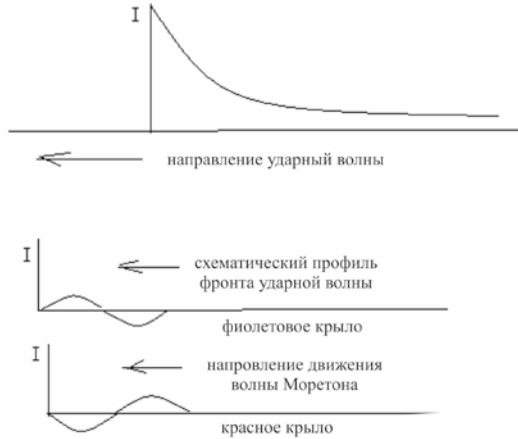


Рис.2. Схематический профиль волны Моретона в фиолетовом и красном крыльях

1. Структура волны Моретона объясняется движением вещества на фронте вверх-вниз, в то время, как такого движения на фронте ударной волны не существует.
2. Обычно толщина ударной волны бывает небольшой, в то время как толщина волны Моретона (по горизонтали) доходит до 150 000 км.
3. Если бы эта волна была ударной, она быстро затухла бы [4].
4. На рис.2 приведены схематические профили яркости на фронте ударной волны и наблюдаемые профили яркости волны Моретона на синем и красном крыльях линии  $H_{\alpha}$ . Сравнивая эти рисунки, можно сделать однозначный вывод о том, что волна Моретона ни как не может быть ударной волной.

### Может ли волна Моретона быть гравитационной волной?

Фазовая скорость  $v$  гравитационной волны в атмосфере Солнца, можно определить по формуле

$$v = \sqrt{g/k}$$

где  $g$  гравитационное ускорение на Солнце,  $k=1/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  длина волны Моретона. Учитывая, что  $g \approx 0.274 \text{ km}/\text{c}^2$ ,  $\lambda = 10^5 \text{ km}$  получаем, что  $v=166 \text{ км/с}$ . Это на порядок меньше значения наблюдаемой фазовой скорости волны Алфвена. Отсюда можно сделать однозначный вывод о том, что волна Моретона не может быть гравитационной волной.

## Дискуссия и результаты

Показывается, что эта волна Моретона не может распространяться в короне, так как время охлаждения короны до температуры излучения линии  $H_{\alpha}$  ( $\sim 10\,000\text{K}$ ) значительно превышает четверти периода волны.

Если бы волна Моретона распространялась в хромосфере, то она должна была бы наблюдаться как яркое образование над краем диска Солнца и ее легко можно было бы наблюдать так как волна не наблюдается над диском Солнца, то можно сказать, что волна не распространяется в хромосфере.

Сравнение наблюдаемой структуры волны со схематической структурой ударной волны показывает, что волна Моретона не является ударной волной.

Если волна Моретона не распространяется ни в хромосфере (по крайней мере в верхней хромосфере) и не в короне, естественно сделать заключение о том, что она распространяется в фотосферных слоях (точнее в области формирования линии поглощения  $H_{\alpha}$ ).

Волна Моретона наблюдается в линии  $\lambda\,10830\text{ \AA}$  HeI, которая формируется в хромосфере. Тогда возникает вопрос: почему та же волна не наблюдается в линии  $H_{\alpha}$  в слоях хромосферы?. Этот факт можно объяснить если предположить, что линия  $\lambda\,10830\text{ \AA}$  HeI формируется, главным образом, в нижней хромосфере.

Принято считать, что на фронте волны вещество совершает радиальные колебательные движения вверх-вниз. Именно благодаря наличию такого движения волна Моретона и видна. Причем, это верно для как для модели облака, так и для модели учитывающей смещение всей линии. Если бы это было так, то с приближением фронта волны к краю диска она должна была исчезать, что не наблюдается. Эту трудность можно устранить, если предположить, что на фронте волны имеет место и периодическое изменение плотности вещества. В таком случае, видимость фронта волны, обусловленное радиальными периодическими движениями вверх-вниз по мере приближения к лимбу исчезнет, а эффект периодического изменения плотности останется.

Если волна Моретона не распространяется в хромосфере (по крайней мере, в верхней хромосфере, как было показано выше), то очевидно, что механизм генерации этой волны, предложенный Uchida, не может работать. Распространяющаяся в короне EIT-волна не может генерировать волну в области формирования линии поглощения  $H_{\alpha}$ , не «затрагивая» хромосферный слой. То же самое можно сказать о механизме генерации, предложенный Chen et al и од [5], согласно которому волна возникает вследствие последовательного открывания магнитных силовых линий при извержении корональной массы (CME).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кули-Заде Д.М. и др. Вестник БГУ, 2012, в печати
2. Muhr N., Vršnak B., Temmer M., Veronig A.M. and Magdalenic J.: ApJ, 2009, v. 708, p.1639.
3. Balasubramaniam K. S., Pevtsov A. A. and Neidig D.F.: ApJ, 2007, v.658, p. 1372.
4. Meyer F.: Structure and Development of Solar Active Regions, ed. Kiepenheuer K. O., Dordrecht D. Reidel, 1968, p. 485.
5. Chen P.F., Ding M.D. and Fang C.: Space Sci. Rev., 2005, v.121, p.201.
6. Narukage N., Hudson H. S., Morimoto T., Akiyama S., Kitai R., Kurokawa H. and Shibata K.: ApJ, 2002, v. 572, p. L 109.
7. Narukage N., Morimoto T., Kadota M., Kitai R., Kurokawa H. and Shibata, K.: PASS, 2004, v.56, p. L 5.
8. Vršnak B., Magdalenic J., Timmer M., Veronig A., Warmuth A., Mann G., Aurass H. and Otruba W.: ApJ, 2005, v. 625, p. L67.
9. Zhukov A.N. and Auchère F.: A& A, 2004, v. 427, p. 705.
10. Gilbert H.R. and Holzer E.: ApJ, 2004, v. 610, p.572.
11. Gilbert H.R., Holzer T.E., Thomson B. J.: ApJ, 2004, v. 607, p. 540.
12. Timmer M., Veronig A., Vršnak B., Thalmann T. and Hanslmeier A.: Proceedings of the 11th European Solar Physics meeting: "The Dynamic Sun: Challenges for theory and observation" (ESA SP- 600). 11-16 sept., 2005, Leuven, Belgium. Editors: D. Danesy, S. Poedts, A. De Groof and I. Andries . Published on CDROM, 2005, p. 144.
13. Muhr N., Temmer M., Veronig A., Vršak B. and Hanslmeier A.: Cent. Eur. Astrphys. Bull., 2008, v. 32, p.1,
14. Veronig A. M., Temmer M., Vršnak B. and Tellemann J.K.: ApJ, 2008, v. 647, p.1466.
15. Pick M., Malherbe J.-M., Kerdraon A. and Maia D. J. F. : ApJ, 2009, v.631, p. L97.
16. Uchida Y., Altschuler M.D. and Newkirk G. Jr.: SoPh, 1973, v.28, p.495.
17. Zhang H.: A&A, 2001, v. 372, p. 676 .

## GÜNƏŞ ATMOSFERİNDƏ MORETON DALĞALARININ TƏBİƏTİ HAQQINDA

**C.M. QULUZADƏ, S.H. MƏMMƏDOV, N.S. CƏLİLÖV, A.A. PEVTSOV**

### XÜLASƏ

Göstərilir ki, Moreton dalğası taçda yayıla bilməz, ona görə ki, taçın 10000 K-ə qədər soyuma vaxtı bu dalğanın dövründən bir tərtib artıqdır. Təkid olunur ki, Moreton dalğası zərbə dalğası deyil, ona görə ki, dalğanın müşahidə olunan cəbhəsi zərbə dalğası üçün xarakterik olan qırılmaya məxsus deyil. Bundan başqa əsaslandırılır ki, Moreton dalğası qravitasiya dalğası deyil.

**Açar sözlər:** Günəş, Moreton dalğaları, dalğanın təbiəti.

## ON THE NATURE OF MORETON WAVES IN THE SOLAR ATMOSPHERE

**D.M. KULI-ZADE, S.H. MAMMADOV, N.S. JALILOV, A.A. PEVTSOV**

### SUMMARY

It is shown that Moreton waves cannot extend in the crown as the time of cooling of the coronal gas exceeds the wave period up to 10000K temperature. It is affirmed, that a Moreton wave is not a shock wave as the observable front profile has no characteristics rupture for the shock wave case. Besides, it is provided that Moreton wave cannot be considered gravitational.

**Key words:** Sun, Moreton waves, the nature of waves.

*Поступила в редакцию: 09.03.2012 г.*

*Подписано к печати: 08.05.2012 г.*