

**ПЕРИОД ОТСЕЧКИ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЛН
В КОРОНАЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУРАХ**

А.Н. Афанасьев

**CUT-OFF PERIOD FOR SLOW MAGNETOACOUSTIC WAVES
IN CORONAL PLASMA STRUCTURES**

A.N. Afanasyev

В работе рассматривается распространение длинных медленных магнитоакустических волн в изотермических корональных магнитоплазменных трубках. Исследуется влияние на распространение возмущений волноводных свойств среды, магнитной природы возмущений, а также стратификации среды вследствие гравитации. Используется приближение тонкой магнитной трубки без учета дисперсии из-за конечного радиуса трубки. Получено волновое уравнение для трубочных волн, которое приведено к уравнению Клейна–Гордона с переменными коэффициентами. Проанализированы вертикальные профили периода отсечки в корональных условиях в сравнении с известными случаями постоянной альфвеновской скорости и звуковых волн.

We consider the propagation of long-wavelength slow magnetoacoustic waves in isothermal coronal magnetic flux tubes. We investigate the role of obliqueness, magnetic effects and stratification of the medium due to gravity in the propagation of waves. We apply the thin flux tube approximation, neglecting the dispersion due to the finite radius of the flux tube. We derive the wave equation for tube waves and reduce it to the form of Klein–Gordon equation with varying coefficients. The vertical profiles of the cut-off period are analysed for the coronal conditions and compared with the known case of the constant Alfvén speed as well as with the pure acoustic case.

Наблюдаемые в крайнем ультрафиолетовом диапазоне продольные волны в корональных магнитных петлях и веерных структурах активных областей, а также в перьевых структурах корональных дыр интерпретируются как возмущения медленной магнитоакустической (ММЗ) природы [Roberts, 2006]. Их периоды находятся в довольно широком интервале от нескольких минут до нескольких десятков минут. По отношению к длинным ММЗ-волнам, солнечная корона проявляет существенные дисперсионные свойства, что отражается в эффекте отсечки для гармонических волн и дисперсионном расплывании и появлении осциллирующих хвостов для широкополосных импульсов.

Поведение волн больших периодов в диспергирующей солнечной атмосфере интенсивно исследовалось в течение нескольких предыдущих десятилетий. Значительное число аналитических исследований было посвящено вырожденному случаю распространения звуковых волн строго вдоль магнитного поля (напр., [Sutmann et al., 1998]). Также рассматривалось распространение ММЗ-волн в волноводных условиях магнитных трубок, т. е. так называемая «трубочная» мода [Defouw, 1976; Rae, Roberts, 1982; Hasan, Kalkofen, 1999; Musielak, Ulmschneider, 2003]. Однако в этих работах авторы анализировали довольно экзотический случай, когда альфвеновская скорость постоянна в солнечной короне. Этому соответствует экспоненциальная расходимость магнитного поля трубки с характерным масштабом равным удвоенной высоте однородной атмосферы, что может не выполняться в условиях реальной короны. Для описания дисперсионной эволюции волновых возмущений авторы получали уравнение Клейна–Гордона с постоянными коэффициентами, предполагая, что магнитные трубки заполнены изотермической плазмой. Существенно отличающимися были постановки задачи с переменными профилями альфвеновской скорости [Thomas, 1982; Roberts, 2006], однако, в них авторы рассмат-

ривали постоянное магнитное поле, ориентированное строго горизонтально и вертикально. В настоящей работе аналитически рассматривается распространение длинных ММЗ (трубочных) волн в корональных плазменных структурах с учетом произвольного (в рамках сделанных предположений о тонкой трубке) изменения магнитного поля.

Для анализа распространения вдоль корональной плазменной структуры ММЗ-возмущений с длиной волны значительно большей поперечного размера трубки используется приближение тонкой магнитной трубки (напр., [Zhugzhda, 1996]). Рассматривается прямая осесимметричная силовая трубка, заполненная более плотной в сравнении с окружающей средой плазмой, что обеспечивает такой структуре волноводные свойства. Мы пренебрегаем дисперсионными эффектами, обусловленными конечной шириной волновода, а также реакцией окружающей плазмы, однако, учитываем дисперсию волн вследствие гравитации. Возмущения предполагаются линейными и осесимметричными (мода $m=0$). Линеаризуя уравнения идеальной магнитной гидродинамики, записанные в приближении тонкой трубки, мы получаем волновое уравнение, описывающее распространение линейных ММЗ-волн в магнитоплазменных структурах в условиях стратифицированной атмосферы:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_{\tau}^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{B_0} \frac{dB_0}{dz} c_{\tau}^2 \frac{V_A^2 - c_0^2}{V_A^2 + c_0^2} + \gamma g \frac{c_{\tau}^4}{c_0^4} \right) \frac{\partial u}{\partial z} + \\ & + \left[c_{\tau}^2 \frac{1}{B_0} \frac{d^2 B_0}{dz^2} + c_{\tau}^2 \frac{1}{B_0^2} \left(\frac{dB_0}{dz} \right)^2 \frac{c_0^2 - V_A^2}{V_A^2 + c_0^2} + \right. \\ & + \frac{1}{B_0} \frac{dB_0}{dz} \frac{2g c_{\tau}^2}{V_A^2 + c_0^2} + \frac{1}{B_0} \frac{dB_0}{dz} \gamma g \frac{c_{\tau}^2}{c_0^2} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{c_{\tau}^2}{c_0^2} \right) + \\ & \left. + N^2 + \frac{c_{\tau}^2}{c_0^2} \frac{g}{H} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{c_{\tau}^2}{c_0^2} \right) \right] u = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

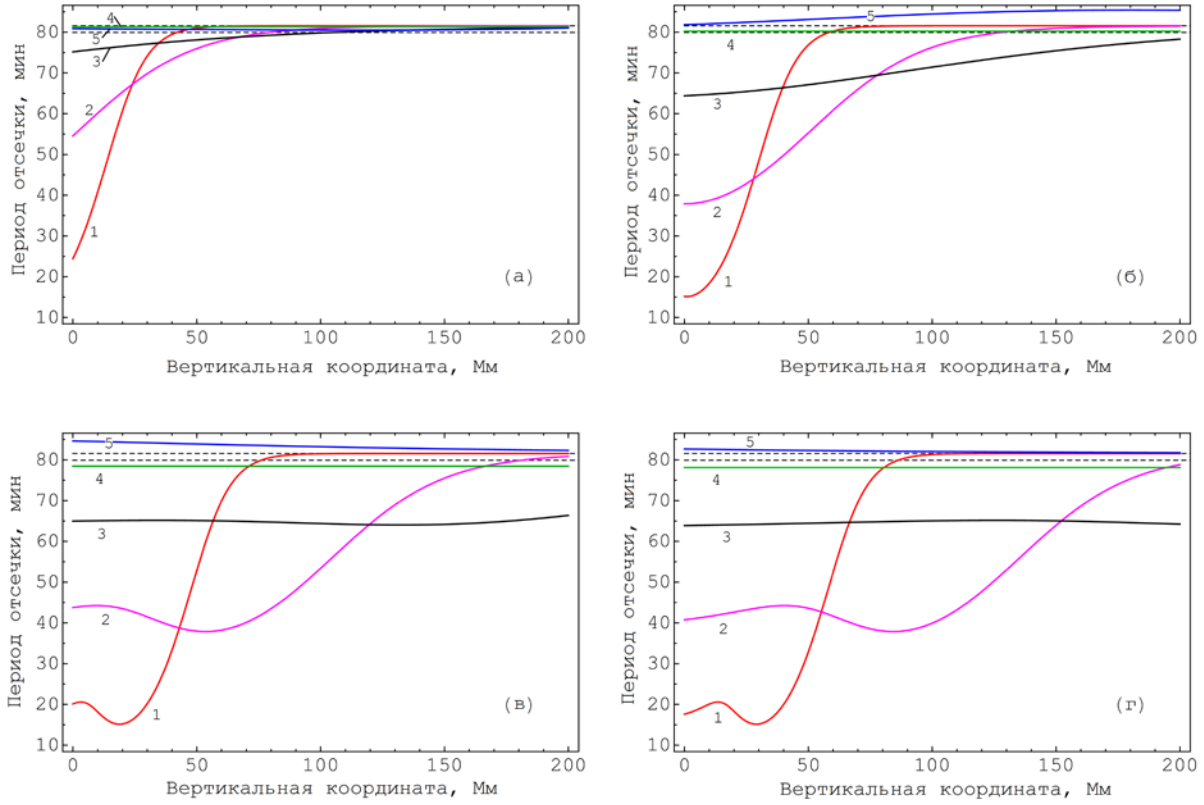


Рис. 1. Высотная зависимость периода отсечки продольных волн в экспоненциально расходящейся магнитной трубке. Различные кривые соответствуют разным значениям характерного масштаба L изменения магнитного поля с высотой. Кривые 1 – $L=0.2 H$, 2 – $L=0.5 H$, 3 – $L=H$, 4 – $L=2 H$, 5 – $L=5 H$. Пунктирные линии показывают значения периода акустической отсечки (нижняя) и периода Бранта–Вайсяля (верхняя). Различные панели демонстрируют периоды отсечки волн для различных значений плазменного параметра β в трубке – $\beta > 1$ (а), $\beta \sim 1$ (б), $\beta < 1$ (в), $\beta \ll 1$ (г).

где u – продольная скорость плазмы в волне, c_T , c_0 и V_A – трубочная, звуковая и альфвеновская скорости, z и t – координата вдоль трубки и время, $\gamma=5/3$ – показатель адиабаты, g – ускорение свободного падения на Солнце, B_0 – магнитное поле в трубке, а также введены частота Бранта–Вайсяля N и высота однородной атмосферы H , постоянные для рассматриваемой нами изотермической атмосферы с концентрацией электронов в основании $5.0 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ и температурой 1.4 МК.

В предельном случае бесконечного магнитного поля ($V_A/c_0 \rightarrow \infty$) движения плазмы в ММЗ-волне становятся продольными как в звуковой, и уравнение (1) переходит в хорошо известное волновое уравнение для звуковых волн в изотермической стратифицированной атмосфере при условии, что градиент невозмущенного магнитного поля конечен. При постоянном вертикальном магнитном поле уравнение (1) преобразуется к уравнению, полученному Робертсом [Roberts, 2006].

С помощью экспоненциальной замены уравнение (1) может быть приведено к уравнению Клейна–Гордона для функции $U(z)=u(z)\exp\{-\Psi(z)\}$, которое содержит величину ω_u^2 , которая формально подобна частоте акустической отсечки для звуковых волн:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - c_T^2 \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \omega_u^2 U = 0, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \omega_u^2 = & \frac{c_T^2}{4} \left(\frac{1}{B_0} \frac{dB_0}{dz} \frac{V_A^2 - c_0^2}{V_A^2 + c_0^2} + \frac{1}{H} \frac{c_T^2}{c_0^2} \right)^2 - \\ & - \frac{c_T^2}{2} \left(\frac{1}{B_0} \frac{dB_0}{dz} \frac{V_A^2 - c_0^2}{V_A^2 + c_0^2} + \frac{1}{H} \frac{c_T^2}{c_0^2} \right)' + c_T^2 \frac{1}{B_0} \frac{d^2 B_0}{dz^2} + \\ & + c_T^2 \frac{1}{B_0^2} \left(\frac{dB_0}{dz} \right)^2 \frac{c_0^2 - V_A^2}{V_A^2 + c_0^2} + \frac{1}{B_0} \frac{dB_0}{dz} \frac{2g c_T^2}{V_A^2 + c_0^2} + \\ & + \frac{1}{B_0} \frac{dB_0}{dz} \gamma g \frac{c_T^2}{c_0^2} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{c_T^2}{c_0^2} \right) + N^2 + \frac{c_T^2}{c_0^2} \frac{g}{H} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{c_T^2}{c_0^2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

В действительности, уравнение (2) представляет собой уравнение с переменными коэффициентами, поэтому следует внимательно проанализировать свойство отсечки в таком случае. Между тем, представляют значительный интерес высотные профили частоты отсечки (3) в условиях гравитационной стратификации плазмы и изменяющегося магнитного поля.

Чтобы продемонстрировать основные отличия от известных случаев постоянной альфвеновской скорости и распространения звуковых волн, рассмотрим экспоненциально расходящееся магнитное поле в трубке, $B_0 = B_{00} \exp\{-z/L\}$, с различными значениями характерного пространственного масштаба L и величины поля в основании трубки B_{00} . Для удобства будем анализировать период отсечки $2\pi/\omega_u$. На рисунке представлена высотная зависимость перио-

да отсечки продольных волн для разных значений L . Различные панели соответствуют значениям: $a - B_{00}=0.5$ G, $V_A=43$ км/с; $b - B_{00}=1.5$ G, $V_A=130$ км/с; $c - B_{00}=5.0$ G, $V_A=433$ км/с; $d - B_{00}=10$ G, $V_A=866$ км/с. Скорость звука $c_0=175$ км/с. Пунктирные линии показывают значения периода акустической отсечки (нижняя) и периода Бранта–Вайсяля (верхняя).

В случае слабо расходящихся трубок (кривая 5) в сравнении со спадом плотности изменение в периоде отсечки незначительно и достигает только 6 % при значении плазменного параметра $\beta \sim 1$. Случай $L=2H$ (кривая 4) представляет собой случай постоянной альфвеновской скорости. Соответственно, период отсечки не изменяется с высотой; отличие от акустического значения также незначительно. Особый интерес представляют случаи сильно расходящегося магнитного поля (кривые 1 и 2). Здесь стоит отметить, что наличие сверхрадиальной расходимости корональных перьевых структур было зарегистрировано в наблюдениях [Deforest et al., 1997]. Кроме того, при интерпретации наблюдений подчеркивалась важность геометрического фактора расходимости трубки на эволюцию распространяющихся продольных волн [Marsh et al., 2011]. Итак, период отсечки падает до 15–40 мин в основании короны, а затем возрастает до акустического значения периода отсечки. В условиях $\beta < 1$ на профиле периода отсечки присутствуют локальные максимумы на малых высотах, а также довольно протяженные области пониженных значений периода отсечки.

В случае однородных профилей характеристической скорости распространения волн и частоты отсечки (т. е. в случае уравнения с постоянными коэффициентами) эффект отсечки проявляется в том, что гармонические волны с частотой меньше частоты отсечки экспоненциально затухают с высотой. Поэтому стратифицированная атмосфера препятствует проникновению длинных волн в верхние слои. Подобным образом области в солнечной короне с пониженным значением периода отсечки могут ограничивать поток волн соответствующих периодов при условии, что такие области довольно протяженны по высоте, иначе возможно прохождение (туннелирование) волн сквозь них. С другой стороны, при импульсном возбуждении среды возникает дисперсионный отклик в виде осциллирующего

хвоста, причем колебания происходят на частоте отсечки. Поэтому пониженное значение периода отсечки может быть ответственным за появление соответствующих колебаний в короне. И действительно, колебания с периодами 15–75 мин уверенно регистрируются в современных корональных наблюдениях и могут быть проинтерпретированы с привлечением эффекта понижения периода отсечки ММЗ-волн, распространяющихся в магнитоплазменных структурах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 15–32–20504 мол_а_вед и 15–02–01077), а также международного гранта 7-й Европейской рамочной программы международного обмена сотрудников научных учреждений им. Марии Кюри № PIRSES-GA-2011-295272 RadioSun.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Deforest C.E., Hoeksema J.T., Gurman J.B., et al. Polar Plume Anatomy: Results of a Coordinated Observation // *Solar Phys.* 1997. V. 175. P. 393–410.
- Defouw R.J. Wave propagation along a magnetic tube // *Astrophys. J.* 1976. V. 209. P. 266–269.
- Hasan S.S., Kalkofen W. Excitation of Oscillations in Photospheric Flux Tubes through Buffeting by External Granules // *Astrophys. J.* 1999. V. 519. P. 899–910.
- Marsh M.S., De Moortel I., Walsh R.W. Observed Damping of the Slow Magnetoacoustic Mode // *Astrophys. J.* 2011. V. 734. Id. 81.
- Musielak Z.E., Ulmschneider P. Atmospheric oscillations in solar magnetic flux tubes: I. Excitation by longitudinal tube waves and random pulses // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 400. P. 1057–1064.
- Rae I.C., Roberts B. Pulse propagation in a magnetic flux tube // *Astrophys. J.* 1982. V. 256. P. 761–767.
- Roberts B. Slow magnetohydrodynamic waves in the solar atmosphere // *Phil. Trans. R. Soc. A* 2006. V. 364. P. 447–460.
- Sutmann G., Musielak Z.E., Ulmschneider P. Acoustic wave propagation in the solar atmosphere. III. Analytic solutions for adiabatic wave excitations // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 340. P. 556–568.
- Thomas J.H. The local dispersion relation for magneto-atmospheric waves // *Astrophys. J.* 1982. V. 262. P. 760–767.
- Zhugzhda Y.D. Force-free thin flux tubes: Basic equations and stability // *Phys. Plasmas* 1996. V. 3. P. 10–21.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия