

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КРУТИЛЬНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В МАГНИТНЫХ ТРУБКАХ

<sup>1,2</sup>С.А. Белов, <sup>1,2</sup>Д.С. Рящиков, <sup>1,2</sup>Н.Е. Молевич, <sup>1,2</sup>Д.В. Агапова

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия  
mr\_beloff@mail.ru

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

## PROPAGATION OF NONLINEAR TORSIONAL ALFVÉN WAVES IN MAGNETIC FLUX TUBES

<sup>1,2</sup>S.A Belov, <sup>1,2</sup>D.S. Riashchikov, <sup>1,2</sup>N.E. Molevich, <sup>1,2</sup>D.V. Agapova

<sup>1</sup>Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Samara, Russia  
mr\_beloff@mail.ru

<sup>2</sup>Samara National Research University, Samara, Russia

**Аннотация.** Аналитически и численно рассмотрена генерация продольных возмущений плазмы нелинейными крутильными альфвеновскими волнами в однородной магнитной трубке. Показано, что профиль индуцированного возмущения плотности в данном случае не зависит от радиальной координаты, а величина возмущения определяется условиями непрерывности полного давления и радиальной скорости на границе магнитной трубки.

**Ключевые слова:** альфвеновские волны, солнечная атмосфера, магнитные трубки.

**Abstract.** The generation of longitudinal plasma perturbations by nonlinear torsional Alfvén waves in a uniform magnetic flux tube is considered analytically and numerically. It is shown that the profile of the induced density perturbation in this case does not depend on the radial coordinate, and the magnitude of the perturbation is determined by the continuity conditions for the total pressure and radial velocity at the boundary of the magnetic flux tube.

**Keywords:** Alfvén waves, solar atmosphere, magnetic flux tubes.

### ВВЕДЕНИЕ

Крутильные альфвеновские волны широко наблюдаются в солнечной атмосфере, например в фотосферных ярких точках [Jess et al., 2009], хромосферных спикулах [De Pontieu et al., 2012], а также корональных структурах [Kohutova et al., 2020]. Более того, существуют наблюдательные свидетельства генерации крутильных альфвеновских волн в результате солнечных вспышек [Aschwanden, Wang, 2020].

Интерес к наблюдениям альфвеновских волн обусловлен тем, что они рассматриваются в качестве потенциального переносчика энергии для нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра. Однако наблюдения крутильных альфвеновских волн осложнены тем фактом, что в линейном приближении они несжимаемы. Нелинейные крутильные альфвеновские волны, в свою очередь, способны индуцировать возмущения плотности и других сжимаемых величин в плазме, что могло бы быть их наблюдательной сигнатурой, но из-за их неколлективной природы крутильных альфвеновских под вопросом оказывается объемная структура индуцированных ими возмущений. По этой причине наблюдаемую модуляцию радиоизлучения в солнечной короне связывают с воздействием быстрых, а не альфвеновских волн [Kolotkov et al., 2018].

С другой стороны, наличие неоднородностей плазмы поперек магнитного поля может приводить к смешению фаз при распространении крутильных альфвеновских волн, приводя к генерации быстрых магнитоакустических волн и сложным радиальным паттернам возмущений [Nakariakov et al., 1997; Wooscock, Tsiklauri, 2022]. Кроме того, численное моделирование показывает, что стоячие крутильные альфвеновские волны могут создавать плотные волокна, тем самым создавая волноводы для МГД-мод других типов [Díaz-Suárez,

Soler, 2021]. Численное моделированное, проведенное для условий однородной магнитной трубки, показало, что крутильные альфвеновские волны, амплитуда которых линейно зависит от радиуса, способны создавать однородное возмущение плотности [Shestov et al., 2017].

Целью данной работы является рассмотрение процесса генерации крутильными альфвеновскими волнами продольных возмущений плазмы в однородной магнитной трубке.

### ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Рассмотрим нелинейную динамику малых возмущений плазмы. Для этого преобразуем систему идеальных МГД-уравнений с помощью теории возмущений и учтем слагаемые вплоть до второго порядка малости включительно. Будем полагать, что возмущения имеют аксиальную симметрию, а магнитоакустические возмущения изначально отсутствуют в плазме. При таких условиях система уравнений, описывающая бегущие крутильные альфвеновские волны и индуцированные ими возмущения плазмы, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 B_\phi}{\partial t^2} - C_A^2 \frac{\partial^2 \tilde{B}_\phi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

$$\left[ (C_A^2 + C_S^2) \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \right) D_T - D_A D_S \right] \tilde{\rho} = 0, \quad (2)$$

$$\left[ (C_A^2 + C_S^2) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) D_T - D_A D_S \right] \tilde{v}_z + \frac{1}{8\pi\rho_0} C_A^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( \frac{\partial^2 \tilde{B}_\phi^2}{\partial t \partial z} \right) = 0, \quad (3)$$

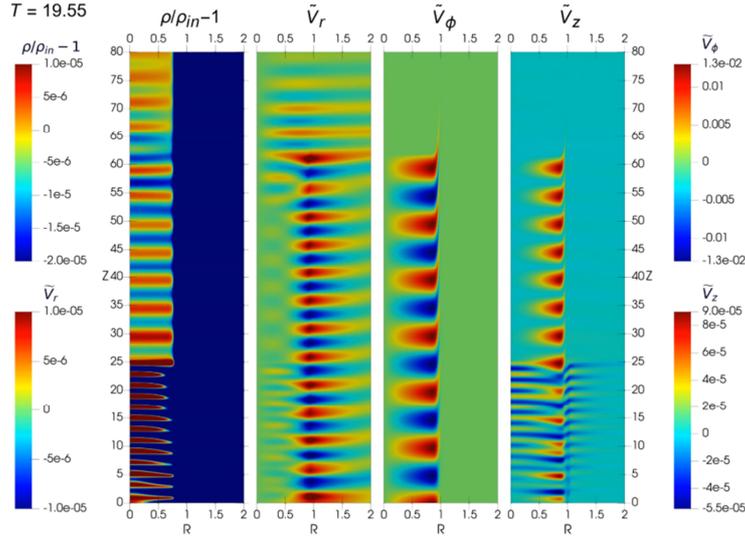


Рис. 1. Результаты численного моделирования распространения крутильных альфвеновских волн в однородной магнитной трубке для случая драйвера с линейно зависящей от радиуса амплитудой альфвеновской волны

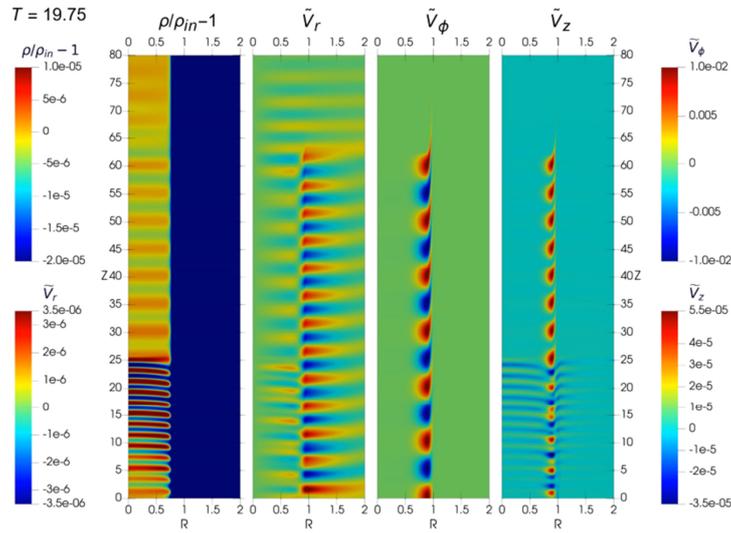


Рис. 2. Результаты численного моделирования распространения крутильных альфвеновских волн в однородной магнитной трубке для случая кольцевого драйвера

где  $D_N = \partial^2 / \partial t^2 - C_N^2 \partial^2 / \partial z^2$ . Уравнения (2) и (3) описывают возмущения плотности и продольной скорости, соответственно, для случая, когда альфвеновская волна имеет вид  $\tilde{B}_\phi = \tilde{B}_\phi(r, \xi)$ , где  $\xi = z - C_A t$ . Решение уравнения (3) можно искать в виде  $\tilde{v}_z = \tilde{v}_z(r, \xi)$ , тогда оно преобразуется к следующему уравнению:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \left[ \tilde{v}_z - \frac{\tilde{B}_\phi^2}{8\pi\rho_0 C_A} \right] = 0. \quad (4)$$

Уравнение, совпадающее с уравнением (4), было получено ранее в [Scalisi et al., 2021]. Решение полученного уравнения можно представить в виде  $\tilde{v}_z = \tilde{B}_\phi^2 / 8\pi\rho_0 C_A + V(\xi)$ , где  $V(\xi)$  — произвольная функция  $\xi$ , определяемая из граничных условий. Из уравнения (2) также следует, что возмущение плотности  $\tilde{\rho}$  может быть произвольной функцией  $\xi$ . Далее беря в расчет уравнение движения, спроеци-

рованное на направление внешнего магнитного поля, и учитывая решение уравнения(4), можно показать, что  $\tilde{\rho} = \rho_0 C_A V / C_s^2$ .

Таким образом, видно, что возмущение плотности, возникающее в результате прохождения крутильной альфвеновской волны в однородной магнитной трубке, не зависит от радиального профиля альфвеновской волны, а определяется только граничными условиями на оси трубки. Другими словами, величина индуцированного возмущения плотности будет определяться условиями непрерывности радиальной скорости и полного давления.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КРУТИЛЬНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ОДНОРОДНОЙ МАГНИТНОЙ ТРУБКЕ

Для проведения численного моделирования распространения крутильных альфвеновских волн в од-

нородной магнитной трубке нами была использована постановка задачи, аналогичная представленной в работе [Shestov et al., 2017]. Для проверки теоретического вывода мы рассмотрели два типа драйверов. В первом случае амплитуда альфвеновской волны линейно зависела от радиальной координаты, во втором драйвер представлял собой возмущение небольшого кольца в магнитной трубке.

На рис. 1, 2 показаны результаты проведенных расчетов. Можно заметить, что возмущения плотности в обоих случаях, как и предполагалось теоретически, являются однородными по радиальной координате, чего нельзя сказать о возмущениях радиальной и аксиальной скоростей, индуцированных крутильной альфвеновской волной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при распространении нелинейных крутильных альфвеновских волн в однородной магнитной трубке происходит генерация сжимаемых возмущений плазмы. При этом индуцированное возмущение плотности не зависит от радиальной координаты, а его значение определяется условиями непрерывности радиальной скорости и полного давления на границе магнитной трубки.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2020-0014, 0023-2019-0003) и РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90018.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aschwanden M.J., Wang T. Torsional Alfvénic oscillations discovered in the magnetic free energy during solar flares. *Astrophys. J.* 2020. Vol. 891, no. 1. P. 99.
- Boocock C., Tsiklauri D. Enhanced phase mixing of torsional Alfvén waves in stratified and divergent solar coronal structures. II. Non-linear simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2022. Vol. 510, no. 2. P. 2618–2627.
- De Pontieu B., et al. Ubiquitous torsional motions in type II spicules. *Astrophys. J. Lett.* 2012. Vol. 752, no. 1. P. L12.
- Díaz-Suárez S., Soler R. Overdense threads in the solar corona induced by torsional Alfvén waves. *Astrophys. J. Lett.* 2021. Vol. 922, no. 2. P. L26.
- Jess D.B., et al. Alfvén waves in the lower solar atmosphere. *Science.* 2009. Vol. 323, no. 5921. P. 1582–1585.
- Kohutova P., Verwichte E., Froment C. First direct observation of a torsional Alfvén oscillation at coronal heights. *Astron. Astrophys.* 2020. Vol. 633. P. L6.
- Kolotkov D. Y., Nakariakov V. M., Kontar E. P. Origin of the modulation of the radio emission from the solar corona by a fast magnetoacoustic wave. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 861, no. 1. P. 33.
- Nakariakov V.M., Roberts B., Murawski K. Alfvén wave phase mixing as a source of fast magnetosonic waves. *Solar Phys.* 1997. Vol. 175, no. 1. P. 93–105.
- Scalisi J., et al. Propagation of torsional Alfvén pulses in zero-beta flux tubes. *Astrophys. J.* 2021. Vol. 911, no. 1. P. 39.
- Shestov S.V., et al. Nonlinear evolution of short-wavelength torsional Alfvén waves. *Astrophys. J.* 2017. Vol. 840, no. 2. P. 64.