

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В РАМКАХ ОБОЛОЧЕЧНОЙ МГД-МОДЕЛИ

И.А. Дуканов<sup>1</sup>, Е.В. Юшков<sup>1,2</sup>, Д.Д. Соколов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Кафедра математики, Москва, Россия,  
ilya.dukanov@gmail.com

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

## STUDYING EVOLUTION OF THE ENERGY SPECTRUM OF SOLAR WIND FLUCTUATIONS WITHIN THE FRAMEWORK OF THE SHELL MHD-MODEL

I.A. Dukanov<sup>1</sup>, E.V. Yushkov<sup>1,2</sup>, D.D. Sokoloff<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia,  
ilya.dukanov@gmail.com

<sup>2</sup>Space Research Institute — IKI, Moscow, Russia

**Аннотация.** На данный момент нет единства в определении причин эволюции спектра флуктуаций солнечного ветра. Во многих исследованиях интерес прикован к маркерам, характеризующим развитие турбулентности и процессы энергопереноса в среде. Такими маркерами являются изломы спектров на масштабах больших вихрей, а также на кинетических масштабах. В отсутствии единого мнения можно делать предположения о причинах тех или иных изменений в спектре в процессе эволюции, основываясь на результатах численного моделирования турбулентных процессов в плазме, ограничивая таким образом список возможных причин. В данной работе представлены результаты численного исследования в рамках оболочечной МГД-модели.

**Ключевые слова:** Оболочечные модели, каскадные модели, колмогоровский спектр, физика плазмы, МГД-моделирование, параллельные вычисления, Parker Solar Probe.

**Abstract.** At the moment, there is no unity in determining the causes of the evolution of the spectrum of solar wind fluctuations. In many studies, interest is focused on markers characterizing the development of turbulence and energy transfer processes in such environment. Such markers are spectral breaks on the scale of large eddies, as well as on kinetic scales. In the absence of a consensus, we can make assumptions about the causes of certain changes in the spectrum during the evolution process, based on the results of numerical modeling of turbulent processes in plasma, thus limiting the list of possible causes. This paper presents the results of a numerical study within the framework of the shell MHD model.

**Keywords:** Shell-models, Kolmogorov's spectrum, plasma physics, MHD modeling, parallel computing, Parker Solar Probe.

Солнечный ветер — ключевое связующее звено в системе Солнце-Земля, однако ни физика его формирования, ни физика эволюции еще до конца не ясны [Bruno, Carbone, 2013]. Это факт являлся основной причиной запуска в 2018 году специальной спутниковой миссии Parker Solar Probe (PSP), по большей части, сконцентрированной на вопросе исследования солнечного ветра. За первые пять лет работы эта миссия обеспечила специалистам огромный приток новых данных с высоким временным разрешением и большой вариацией гелиоцентрических расстояний. В частности, она позволила в деталях изучить спектры флуктуаций полей солнечного ветра: поля скорости и магнитного поля, и по-новому взглянуть на турбулентный каскад, формирующийся в межпланетной плазме.

Данные PSP подтвердили ранее обнаруженное наличие в картине спектральной плотности флуктуаций энергии магнитного поля двух изломов, первый из которых расположен вблизи субионного масштаба, второй — на левом конце инерционного интервала, то есть в области вихрей большого масштаба [Chen et al, 2020]. Единого мнения на счет эволюции этих маркеров пока не сложилось, поэтому на данный момент изучение динамики этих изломов, ограничивающих инерционный интервал и определяющих турбулентный каскад, является ключевым. И если для описания около диссипативного излома необходимым кажется привлечение кинетического подхода, то эволюцию

крупномасштабного излома, видимо, можно описать, оставаясь в рамках магнитогидродинамической парадигмы. В настоящей работе, используя в качестве основы данные миссии PSP, мы описываем свободное вырождение турбулентного каскада с помощью оболочечной изотропной МГД-модели и стараемся повторить реально наблюдаемую эволюцию излома спектра.

Для описания турбулентного каскада мы используем оболочечную (от англ. Shell model) или, по-другому, каскадную модель, разработанную Ф. Плунианом и П.Г. Фриком [Фрик, 2003].

Класс оболочечных моделей для систем гидродинамического типа представляет из себя Фурье-образы системы МГД-уравнений, в которых образы нелинейных слагаемых приближены суммой квадратичных нелинейностей таким образом, чтобы в бездиссипативном случае выполнялись законы сохранения трехмерной МГД: сохранения полной энергии, магнитной и перекрестной спиральности. При этом непрерывная спектральная шкала заменяется набором дискретных спектральных оболочек, а в нелинейных слагаемых учитывается обмен энергией только между соседними оболочками. В таком подходе мы используем данные PSP вблизи Солнца как входные и изучаем в процессе свободного вырождения турбулентного каскада возможную эволюцию спектров и динамику движения крупномасштабного

излома. Полученные результаты каскадного моделирования сравниваются с данными PSP на оси Солнце-Земля и на основании сравнения делается вывод о применимости оболочечного анализа и гипотезы свободного вырождения.

Авторы хотели бы выразить искреннюю благодарность П.Г. Фрику за полезные советы и предоставленную модель, а также команде Parker Solar Probe и CDAWEB за предоставленные спутниковые данные [Bale et al., 2016].

Работа поддержана грантом фонда БАЗИС N 21-1-3-63-1.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели. 2003.  
Bale S.D. et al. The FIELDS instrument suite for Solar Probe Plus: measuring the coronal plasma and magnetic field, plasma waves and turbulence, and radio signatures of solar transients // *Space science reviews*. 2016. V. 204. P. 49–82.  
Bruno R., Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // *Living Rev. Solar Phys.* 2013. V. 10. P. 1–208.  
Chen C. H. K. et al. The evolution and role of solar wind turbulence in the inner heliosphere // *Astrophysical J. Supplement Ser.* 2020. V. 246, N 2. P. 53.