

**Л. В. Козак<sup>1</sup>, Р. И. Костык<sup>2</sup>, О. К. Черемных<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
ул. Владимирская, 64/13, Киев, 01601

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680

<sup>3</sup>Институт космических исследований Национальной академии наук Украины —  
Государственного космического агентства Украины  
Проспект Академика Глушкова 40, Киев 187, 03680

## **Два режима турбулентности на Солнце**

*На основе анализа наблюдательных данных, полученных на 70-см германском вакуумном башенном телескопе VTT в Изанье (о. Тенерифе, Испания), установлено, что турбулентные процессы в фотосфере Солнца характеризуются двумя различными режимами турбулентности с двумя различными спектрами. Первый из них является спектром Колмогорова, который описывает плазму с нулевым средним магнитным полем, а второй — спектром Крейчнана с отличным от нуля средним магнитным полем. Установлено, что переход от одного спектра к другому происходит на масштабе 3 Мм. Такой масштаб соответствует характерному размеру мезогрануляции, что указывает на переход к крупномасштабным самоорганизующимся магнитным структурам.*

*ДВА РЕЖИМИ ТУРБУЛЕНТНОСТІ НА СОНЦІ, Козак Л. В., Костик Р. І., Черемних О. К. — На основі аналізу спостережних даних, отриманих на 70-см германському вакуумному телескопі VTT в Ізаньї (о. Тенерифе, Іспанія), встановлено, що турбулентні процеси в фотосфері Сонця характеризуються двома різними режимами турбулентності з двома різними спектрами. Перший із них є спектром Колмогорова, що описує плазму із нульовим середнім магнітним полем, а другий — спектром Крейчнана з відмінним від нуля середнім магнітним полем. Встановлено, що перехід від одного типу спектру до іншого відбувається на масштабі 3 Мм. Такий масштаб відповідає масштабу мезогрануляції, що вказує на перехід до великомасштабних самоорганізованих магнітних структур.*

*TWO TURBULENT REGIMES ON THE SUN, by Kozak L.V., Kostyk R. I., Cheremnykh O. K. — It is found from our observations performed with the 70-cm vacuum tower telescope VTT in Isanie (Tenerife Island, Spain) that*

*turbulent processes in the solar photosphere are characterized by two different spectra of turbulence. The first spectrum is the well-known Kolmogorov spectrum describing the plasma with zero mean magnetic field. The second one is the Kraichnan spectrum with nonzero mean magnetic field. Transition from one spectrum type to another occurs at a scale of 3 Mm. This scale corresponds to meso-granulation one, which points to the transition to large-scale self-organizing magnetic structures.*

## ВВЕДЕНИЕ

Турбулентность — естественное состояние космической плазмы, поэтому исследование ее характеристик является существенно важным для понимания фундаментальных свойств природы. При этом в магнитной гидродинамике на свойства турбулентности могут кардинально влиять как границы потока, так и масштабы структур (волн, вихрей и т. п.), формируемых магнитными и электрическими полями. В плазменных потоках турбулентность может формироваться многими классами неустойчивостей — дрейфово-диссипативными, кинетическими, магнитогидродинамическими (МГД) и др. [2]. Кроме того, турбулентность солнечной плазмы характеризуется большим количеством степеней свободы и нелинейно взаимодействующих мод. Для описания такой среды обычно применяют методы статистической физики и теории вероятности. Это позволяет получить информацию о некоторых средних изменениях макроскопических параметров плазменной среды во времени (или в пространстве), не прибегая к детальному рассмотрению условий возбуждения конкретных нелинейных процессов.

В рамках данной работы мы обратим внимание на особенности турбулентных процессов и их связи со средними магнитными полями в фотосфере Солнца. Это актуально для понимания многих процессов изучаемых в Солнечной физике.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОЙ СРЕДЫ

Классический подход исследования статистических свойств поля скоростей  $(x)$  на локальном масштабе  $l$  в турбулентной движущейся среде состоит в определении функции распределения вероятности флуктуаций скорости, а также в исследовании статистических моментов функции распределения разных порядков  $q$ :  $S_q(l) = \langle | (x - l) - (x) |^q \rangle$ ,

где  $\dots$  — усреднение по ансамблю. При таком подходе турбулентная теория Колмогорова (К41) [5] приводит к гауссовой статистике пульсаций скоростей и определяется степенной зависимостью вида  $S_q(l) \propto l^{-q/3}$ , где  $(q) = q/3$  для модели Колмогорова. В этом случае зависимость

спектра потока энергии от волнового числа может быть представлена в виде  $E_K(k) \propto k^{-5/3}$ . Отметим, что нелинейная зависимость показателя степени моментов функции распределения ( $q$ ) от порядка  $q$  указывает на наличие перемежаемости, т. е. структурной неоднородности турбулентного процесса. При этом темп передачи энергии от источника непостоянен. Такому типу турбулентности соответствует локальное нарушение однородности, когда активные области сосуществуют с пассивными (ламинарными) областями, и периоды относительного «затишья» сменяются всплесками активности [6].

Для описания плазмы при наличии крупномасштабного магнитного поля используется подход, в котором динамика в плоскости поперечной к магнитному полю может быть рассмотрена в рамках двумерной модели. Хорошо известным примером такой модели является двумерная модель МГД-турбулентности Ирошникова — Крейчнана [11]. Последняя обычно используется для интерпретации свойств турбулентности краевой плазмы и позволяет объяснить некоторые наблюдаемые эффекты. В качестве примера такого эффекта можно указать экстремально большие вихри (торнадо в атмосфере Земли и магнитовихревые кольца в солнечном ветре [7]). Спектр энергии в модели Ирошникова — Крейчнана определяется соотношением  $E_{ИК}(k) \propto k^{-3/2}$ . В сравнении с колмогоровским спектром в этом спектре значительно уменьшается уровень передачи энергии на малых масштабах, возмущения МГД-величин движутся со скоростью порядка альвовендовской [11], а моменты функции распределения имеют вид  $S_q(l) \propto l^{q/4}$ .

## НАБЛЮДЕНИЯ

Для статистического и спектрального анализа мы использовали наблюдения активной области Солнца, полученные 13 ноября 2007 г. на германском вакуумном башенном телескопе VTT [13] в Изанье (о. Тенерифе, Испания) в трех участках длин волн: Fe I 1564.3—1565.8 нм, Ba II 455.4 нм, Ca II 396.8 нм. По фильтрограмме в линии Ca II 396.8 нм была выбрана активная область (факел) вблизи центра солнечного диска. Процессом наблюдений управляла ТИР-камера (ИК-спектрополяриметр), входная щель которой сканировала участок поверхности Солнца размерами  $84 \times 5.3$ . В одной серии делалось 15 сканов, затем щель возвращалась в исходное положение.

Продолжительность одного скана составляла 27.3 с, в течение которого регистрировались все четыре параметра Стокса, а серии — 6 мин 50 с. Всего было проведено 22 серии наблюдений. Регистрация велась на ПЗС-матрице размерами  $452 \times 1009$  пкл. Таким образом, пространственное разрешение составляло 0.185", а спектральное — 1.473 пм.

Линия Ba II регистрировалась узкополосным фильтром (TESOS-камера) в непрерывном спектре и 37 длинах волн на ПЗС-камеру

размером  $512 \times 512$  пкл. При передвижении ТИР-щели регистрируемая область не выходила за пределы зрения TESOS-камеры, а только смещалась на  $0.35''$ , т. е. в течение всего времени наблюдений в поле зрения TESOS-камеры находился один и тот же участок поверхности Солнца. Пространственное разрешение составляло  $0.089''$ , спектральное —  $1.6$  пм, а временное —  $25.6$  с. ПЗС-матрица «вырезала» на поверхности Солнца участок размерами  $45.6 \times 45.6$  пкл.

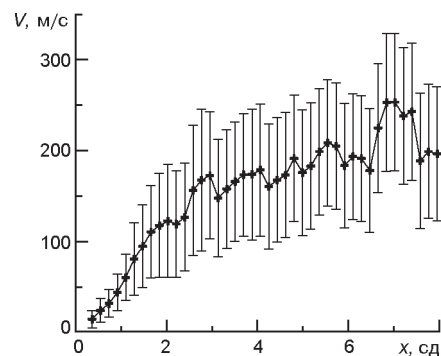
На третьей камере регистрация велась лишь в центре линии Ca II  $396.8$  нм ПЗС-матрицей размерами  $900 \times 900$  пкл. Пространственное разрешение составляло  $0.123''$ , временное —  $4.93$  с.

Во время наблюдений дрожание изображения на входной щели спектрографа, обусловленное нестабильностью земной атмосферы, составляло  $0.4\text{--}0.6''$ .

Следуя стандартной методике, все изображения мы исправили с учетом темнового тока, колебаний прозрачности земной атмосферы и неодинаковой чувствительности пикселей ПЗС-камер. Последующая обработка наблюдательных данных включала в себя нахождение значений скорости в центре (высота образования в атмосфере Солнца  $h = 650$  км) и в далеких крыльях ( $h = 0$ ) линии Ba II. Для этой цели использовалась методика «лямбда-метр» [14]. Для каждого момента времени и для каждой спектральной дорожки вдоль щели спектрографа были найдены значения скорости  $V(h, t, x)$ , а также их усредненные по времени и пространству значения  $\langle V(h) \rangle$ . Затем были определены флуктуации скорости в центре и крыльях исследуемой линии согласно выражению  $V(h, t, x) = V(h, t, x) - \langle V(h) \rangle$ .

Флуктуации параметров  $V$  обусловлены в основном конвективными и волновыми движениями. Для разделения на грануляционную и волновую составляющие поля скоростей была построена диагностическая диаграмма  $k - \nu$ , т. е. зависимость мощности вариаций  $V$  от временной ( $\nu$ ) и пространственной ( $k$ ) частот [10]. В дальнейшем мы использовали лишь конвективную составляющую поля скоростей (рис. 1). Размеры конвективных элементов находились по смене знака скорости  $V(h, t, x)$  вдоль щели спектрографа.

Рис. 1. Наблюдаемые значения флуктуаций скорости в активных областях



## СТАТИСТИЧЕСКИЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ КОНВЕКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ

Для анализа характера турбулентности были использованы две методики, которые базируются на анализе функции распределения флуктуаций скорости и ее моментов, а также проведен спектральный анализ.

**Анализ функции распределения флуктуаций скорости.** Для изучения вида турбулентных процессов принципиально важным является ответ на вопрос: имеет ли место перемежаемость в рассмотренных явлениях на разных масштабах? Поэтому прежде чем рассматривать тип турбулентности, проведем анализ функции распределения флуктуаций скорости.

Функция распределения флуктуаций МГД-величин для случайного процесса удовлетворяет нормальному (т. е. гауссовому) распределению. Известно, что для любых распределений зависимость максимума распределения плотности вероятности  $P_0$  от пространственного масштаба можно аппроксимировать степенной зависимостью вида  $P_0(0, l) \sim l^{-S}$ . При  $S = 0.5$  имеет место гауссово распределение, а для процессов при наличии перемежаемости справедливо неравенство  $S > 0.5$  [1, 3, 4, 9, 12]. Кроме того, значение  $S = 0.5$  указывает на то обстоятельство, что показатель степени для моментов функции распределения ( $q$ ) линейно зависит от порядка  $q$ .

При анализе особенностей функции плотности вероятности флуктуаций скорости была принята во внимание дискретность измерений, поэтому сдвиг  $l$  по пространству выбирался кратным дискретности измерений 0.185 сд. С учетом этого обстоятельства анализировались особенности изменения скорости  $d(l+x) \sim (x)$ . Высота максимума функции плотности вероятности флуктуаций скорости  $P_0(l)$  от сдвига  $l$  по пространству приведена на рис. 2. Видно, что значения степени  $S$  не различаются для разных пространственных масштабов и в среднем составляют  $S = 0.54$ . Таким образом, мы имеем дело с нормальным распределением, которому соответствуют процессы, описывающиеся как моделью Колмогорова, так и моделью Ирошникова — Крейчнана [1, 11].

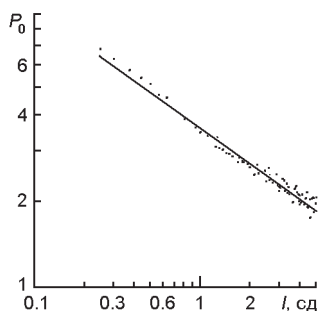


Рис. 2. Значение  $P_0$  максимума функции распределения плотности вероятности флуктуации скорости от шага в пространстве  $l$ . Экспериментальные точки аппроксимируются прямой  $P_0(l) \sim l^{-0.54}$

**Определение характера турбулентных процессов.** Для определения типа турбулентных процессов был проведен анализ моментов функции плотности вероятности для разных порядков. В теории турбулентности этот часто используемый анализ называется поиском расширенного самоподобия (Extended Self-similarity, ESS-анализ) [8]. Он позволяет существенно сузить возможные типы турбулентных процессов. В общем случае такой подход сводится к нахождению зависимости вида

$$S_q(l) = \langle |x - l| (x - l)^q \rangle \sim \langle |x - l| (x - l)^p \rangle l^{(q)/(p)}.$$

После того как такая зависимость определена, ее сравнивают с аналогичными зависимостями для разных моделей турбулентности.

Для сравнения с моделью Колмогорова было построено отношение степени момента функции плотности вероятности  $q$ -го порядка к степени третьего порядка  $p = 3$  (рис. 3, а). ESS-анализ показывает хорошее соответствие турбулентных процессов с колмогоровской моделью турбулентности для значений  $q < 6$ .

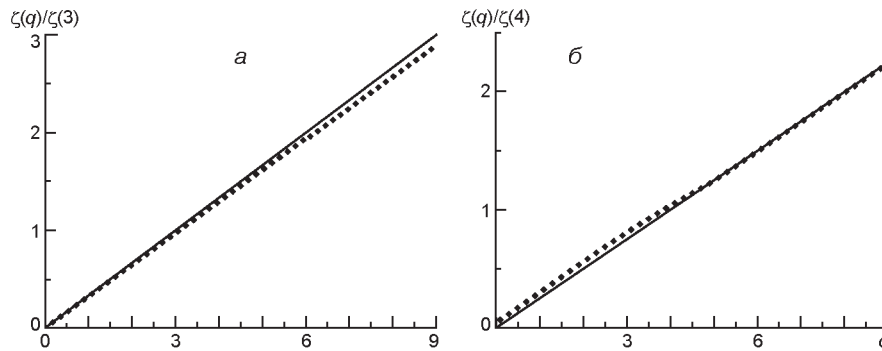


Рис. 3. Отношение  $q$  а и  $q$  б) для активной области. Точки — экспериментальные данные для поля скоростей, сплошные линии соответственно соответствуют значениям  $q/3$  (модель К41, фрагмент а) и  $q/4$  (модель Ирошникова — Крейчнана, фрагмент б)

Для сравнения наблюдаемых результатов с моделью Ирошникова — Крейчнана также был проведен анализ отношения степени момента функции плотности вероятности  $q$ -го порядка к степени четвертого порядка  $p = 4$  (рис. 3, б). Результаты наблюдений — точки, непрерывная линия — модельные значения, рассчитанные по модели Ирошникова — Крейчнана. Видно, что при  $q > 6$  зависимости ближе к модели Ирошникова — Крейчнана. Из данного подхода нельзя определить масштабы перехода от одного процесса к другому, однако можно сделать вывод о наличии двух различных типов турбулентности.

Для конкретизации масштабов турбулентных процессов были рассмотрены спектральные зависимости изменений скорости для активных областей (рис. 4). Видно, что спектральная плотность испытывает излом на масштабах около 3000 км. Линейная аппроксимация ( $k^{-p}$ ),

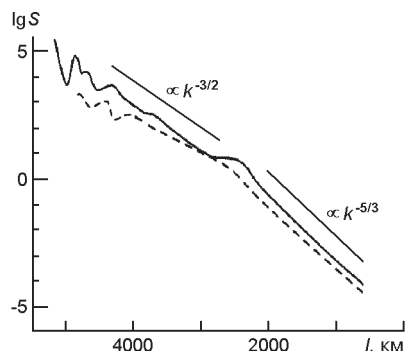


Рис. 4. Спектральная плотность  $S$  конвективной составляющей поля скоростей: сплошная линия — для активной области при  $h = 650$  км, штриховая — для активной области при  $h = 0$

рассчитанная отдельно на больших и малых масштабах, показывает, что спектральные индексы заметно изменяются при переходе из одной области в другую. Такое поведение свидетельствует о том, что турбулентности на разных масштабах качественно различаются. При этом значения показателя степени близки к  $-5/3$  на масштабах до 3000 км и к  $-3/2$  на больших масштабах. Таким образом, на малых масштабах доминируют турбулентные процессы, которые можно описать в рамках модели Колмогорова, а на больших масштабах имеет место анизотропия турбулентных процессов, обусловленная ненулевым средним магнитным полем, и поэтому турбулентные процессы близки к модели Ирошникова — Крейчнана. Отметим, что полученный результат согласуется с изложенными выше результатами статистического анализа.

## ВЫВОДЫ

При анализе конвективной составляющей поля скоростей статистическими и спектральными методами установлено:

— в активных областях Солнца реализуются два различных по своей природе режима турбулентности;

— на малых масштабах имеют место турбулентные процессы, которые можно описать в рамках модели Колмогорова, а на больших масштабах наблюдаются турбулентные процессы типа Ирошникова — Крейчнана;

— переход от спектра Колмогорова к спектру Ирошникова — Крейчнана происходит на масштабах около 3 Мм.

Данный масштаб соответствует масштабу мезогрануляции и свидетельствует о ненулевых средних магнитных полях. Кроме того, это указывает на возможность реализации самоорганизующихся магнитных плазменных структур (пятна, биполярные группы, активные области, комплексы активности и т. д.).

Необходимо отметить, что полученный результат является первым шагом к установлению взаимосвязи между средним магнитным полем и наблюдаемыми крупномасштабными магнитными структурами на Солнце. Подчеркнем, что современная концепция среднего тур-

булентного магнитного поля Солнца, которая обычно используется в теории динамо, ничего не говорит о таких наблюдаемых структурах, как факелы, пятна и др. Поэтому обнаружение второго режима турбулентности с ненулевым средним магнитным полем является принципиально важным для дальнейшего развития и установления связи между наблюдаемыми структурами и параметрами турбулентной среды.

Авторы признательны А. А. Соловьеву, В. Г. Лозицкому и А. С. Парновскому за обсуждения и ценные замечания.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Ф40.2/053 и программы НАН Украины «Геокосмос».

1. Будаев В. П., Савин С. П., Зелёный Л. М. Наблюдения перемежаемости и обобщённого самоподобия в турбулентных пограничных слоях лабораторной и магнитосферной плазмы: на пути к определению количественных характеристик переноса // *Успехи физ. наук.*—2011.—**181**.—С. 905—952.
2. Кадомцев Б. Б. Турбулентность плазмы // *Вопросы теории плазмы / Под ред. М. А. Леонтовича.* — М.: Атомиздат, 1964.—С. 188—335.
3. Козак Л. В., Луи А. Т. Статистический анализ турбулентности плазмы по спутниковым измерениям магнитного поля // *Кинематика и физика небес. тел.*—2008.—**24**, № 4.—С. 72—80.
4. Козак Л. В., Савин С. П., Будаев В. П. и др. Характер турбулентности в пограничных областях магнитосферы Земли // *Геомагнетизм и аэрономия.*—2012.—**52**, № 4.—С. 470—481.
5. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // *Докл. АН СССР.*—1941.—**30**, № 4.—С. 299—303.
6. Новиков Е. А., Стюарт Р. В. Перемежаемость турбулентности и спектр флуктуаций диссипации энергии // *Изв. АН СССР. Сер. геофизика.*—1964.—**3**.—С. 408—413.
7. Петвиашвили В. И., Похотелов О. А. Уединенные волны в плазме и атмосфере. — М.: Энергоатомиздат, 1989.—200 с.
8. Benzi R., Ciliberto S., Tripiccone R., et al. Extended self-similarity in turbulent flows // *Phys. Rev. E.*—1993.—**48**.—P. 29—32.
9. Consolini G., Kretzschmar M., Lui A. T. Y., et al. On the magnetic field fluctuations during magnetospheric tail current disruption: A statistical approach // *J. Geophys. Res.*—2005.—**110**.—A07202. doi:10.1029/2004JA010947.
10. Kostyk R. I., Khomenko E. V. The effect of acoustic waves on spectral-line profiles in the solar atmosphere: Observations and theory // *Astron. Reports.*—2002.—**46**, N 12.—P. 925—931.
11. Kraichnan R. H. Internal-range spectrum of hydromagnetic turbulence // *Phys. Fluids.*—1965.—**8**.—P. 1385—1387.
12. Savin S., Amata E., Zelenyi L., et al. High kinetic energy jets in the Earth's magnetosheath: Implications for plasma dynamics and anomalous transport // *JETP Letters.*—2008.—**87**.—P. 593—599.
13. Schroter E. H., Soltau D., Wiehr E. The German solar telescopes at the Observatorio del Teide // *Vistas in Astron.*—1985.—**28**.—P. 519—525.
14. Stebbins R. T., Goode P. R. Waves in the solar photosphere // *Solar. Phys.*—1987.—**110**.—P. 237—248.

Статья поступила в редакцию 14.06.12