

УДК 523.9-1, 523.9-466, 523-98

## Спектр мощности магнитного поля в невозмущенной фотосфере Солнца

*В.И. Абраменко, О.К. Куценко*

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409  
*vabramenko@gmail.com*

Поступила в редакцию 13 ноября 2019 г.

**Аннотация.** Проведено исследование спектров мощности магнитного поля в невозмущенной фотосфере Солнца по данным инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту станции Solar Dynamics Observatory (SDO). Результаты можно сформулировать следующим образом. 1) Для достоверной оценки спектра мощности в обширной зоне квазиравномерного распределения поля следует выбирать участок длиной не менее 300 пикселей. По оценкам по меньшему участку, мощность на всех доступных частотах оказывается завышенной. 2) Для магнитных зон разной интенсивности, а именно для корональной дыры, спокойного Солнца и супергрануляционной сетки, спектр мощности в диапазоне (2.5–10) Мм проявляет одинаковый спектральный индекс, близкий к  $-1$ . Наблюдаемый спектр более пологий, чем колмогоровский (с наклоном  $-5/3$ ), и отличается от более крутых спектров активных областей. Такой пологий спектр нельзя объяснить только прямым колмогоровским каскадом. Его можно объяснить дополнительной накачкой магнитной энергии за счет мелкомасштабного турбулентного динамо, работающего в широком диапазоне масштабов: от десятков мегаметров до, по крайней мере, 2.5 Мм. На масштабах менее 2.5 Мм SDO/HMI-данные не позволяют адекватно оценить форму спектра. 3) Данные позволяют заключить, что однообразный механизм мелкомасштабного турбулентного динамо работает по всей поверхности Солнца вне активных областей.

MAGNETIC POWER SPECTRUM IN THE UNDISTURBED SOLAR PHOTOSPHERE, *by V.I. Abramenko, O.K. Kutsenko.* Using the magnetic field data obtained with the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO), an investigation of magnetic power spectra in the undisturbed solar photosphere was performed. The results are as follows. 1) To get a reliable estimate of a magnetic power spectrum from the uniformly distributed quiet-sun magnetic flux, a sample pattern of no less than 300 pixels length should be adopted. With smaller patterns, energy on all observable scales might be overestimated. 2) For patterns of different magnetic intensity (e.g., a coronal hole, a quiet-sun area, an area of supergranulation), the magnetic power spectra in a range of (2.5–10) Mm exhibit very close spectral indices of about  $-1$ . The observed spectrum is more shallow than the Kolmogorov-type spectrum (with a slope of  $-5/3$ ) and it differs from steep spectra of active regions. Such a shallow spectrum cannot be explained by the only direct Kolmogorov's cascade, but it can imply a small-scale turbulent dynamo action in a wide range of scales: from tens of megameters down to at least 2.5 Mm. On smaller scales, the HMI/SDO data do not allow us to reliably derive the shape of the spectrum. 3) Data make it possible to conclude that a uniform mechanism of the small-scale turbulent dynamo is at work all over the solar surface outside active regions.

**Ключевые слова:** Солнце, магнитные поля, турбулентность, спектр мощности

---

## 1 Введение

Солнечная фотосфера находится в состоянии развитой турбулентности, при этом наблюдается повсеместное присутствие магнитного поля. Сильные локальные магнитные поля сосредоточены в группах солнечных пятен, т. е. в активных областях, и ими обусловлена вспышечная активность Солнца. Такие поля подвергаются интенсивным исследованиям как в прошлом, так и в настоящее время (см., например, недавний обзор Torgiumi and Wang, 2019). Однако солнечная фотосфера лишь не более чем на 20 % покрыта активными областями (АО), а остальная ее часть занята так называемыми невозмущенными областями, где также присутствует магнитное поле. Это протяженные зоны открытых магнитных полей – корональные дыры (coronal holes, обозначаемые нами здесь как CH); зоны перемежаемых полярностей под ковром низких петель; зоны спокойного Солнца (quiet sun, QS); обширные области остатков распавшихся активных областей, где особенно явно видна супергрануляционная структура поля (мы будем обозначать такие зоны как SG, supergranulation). В целом такие зоны невозмущенной фотосферы дают ощутимый вклад в суммарный магнитный поток (см., например, рис. 2 в статье Jin et al., 2011), поля этих зон – основные агенты меридиональных магнитных потоков в солнечном цикле (например, Wang et al., 1989; Upton and Hathaway, 2014), они же являются объектом турбулентной магнитной диффузии, во многом определяющей результат моделирования динамо (Dikpati and Gilman, 2006). Поэтому разностороннее изучение турбулентных процессов в слабых полях невозмущенной фотосферы заслуживает особого внимания. Один из мощных инструментов изучения турбулентности – вычисление и анализ спектра мощности. Развитая однородная изотропная турбулентность характеризуется колмогоровским спектром  $E(K) \sim k^{(-\alpha)}$  со спектральным индексом  $\alpha = 5/3$  (Колмогоров, 1941). При этом система эволюционирует в квазиравновесном состоянии: ввод энергии в систему на больших масштабах уравновешен выводом энергии (диссипацией) на малых масштабах. Имеет место колмогоровский каскад дробления больших вихрей с образованием множества разномасштабных, более мелких вихрей. Отклонение спектра от колмогоровского свидетельствует либо о нарушении этого равновесия (как в АО, см. Abramenko, 2005), либо о проявлении других механизмов ввода энергии на разных масштабах.

Недостаточное внимание к невозмущенным областям Солнца проявляется и при изучении спектров мощности магнитного поля. Так, для активных областей спектры мощности магнитного поля широко изучаются (Abramenko, 2005; Abramenko and Yurchyshyn, 2010; Hewett et al., 2008; Katsukawa and Ogozco Suarez, 2012), особенно после открытия статистической связи между спектральным индексом и вспышечной активностью АО (Abramenko, 2005). Но в то же время исследования спектров мощности в невозмущенной фотосфере крайне редки (Abramenko et al., 2001). В данной работе мы ставим целью восполнить этот пробел. Современные круглосуточные полнодисковые наблюдения Солнца станцией Solar Dynamics Observatory (SDO) позволяют предпринять такие исследования.

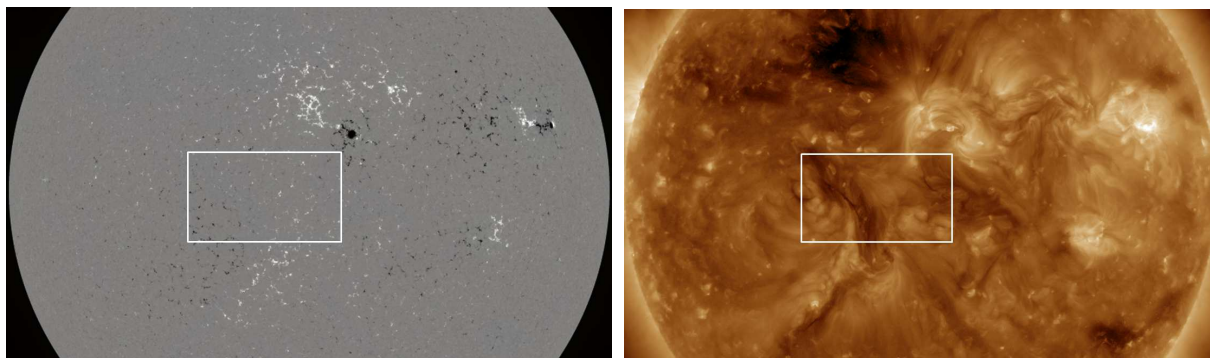
## 2 Данные и метод

Данные о магнитном поле в фотосфере в линии FeI 6173.3 Å были получены на борту космической станции Solar Dynamics Observatory (SDO) инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI). Магнитограммы продольной составляющей магнитного поля в моде hmi.M-720s были получены с пространственным разрешением 1'' (размер пиксела 0.5''). Изучались участки Солнца вблизи центра диска, так что эффект проекции был незначителен. Нас интересовали области в невозмущенной фотосфере, т. е. вне АО.

Спектр мощности магнитного поля вычислялся по методике, предложенной в работах Abramenko et al. (2001) и Abramenko (2005). Методика сводится к вычислению двумерного преобразования Фурье от магнитограммы, а затем производится интегрирование квадрата преобразования Фурье по узким кольцам в пространстве двух волновых чисел. В результате получается одномерный спектр мощности, который зависит только от модуля волнового вектора. Определение корректного выбора инерционного (линейного) интервала спектра, в котором вычисляется его наклон – спектральный индекс  $\alpha$ , а также влияние инструментальных эффектов на форму спектра обсуждаются в работе Abramenko et al. (2001). В работе Абраменко (2016) показано, что при использовании SDO/HMI-магнитограмм спектральный индекс следует определять по интервалу 2.4–10 Мм.

### 3 Влияние размера охватываемой площади на точность построения спектра мощности

Невозмущенная фотосфера простирается на весьма широкие области на поверхности Солнца. А для вычисления спектра мощности необходимо очертить некую замкнутую прямоугольную область. Встает закономерный вопрос: как размер области влияет на форму спектра? Какую минимальную область нужно охватить, чтобы получить устойчивую оценку спектра? Для изучения этих вопросов



**Рис. 1.** SDO/HMI-магнитограмма (слева) и SDO/AIA/193 Å изображение солнечного диска, полученные 19 июня 2017 года в 19:24 UT. Прямоугольником обозначена исследуемая область невозмущенной фотосферы размером  $930 \times 530$  пикселей, в пределах которой выбирались участки разных размеров (см. таблицу 1) и вычислялись спектры мощности магнитного поля

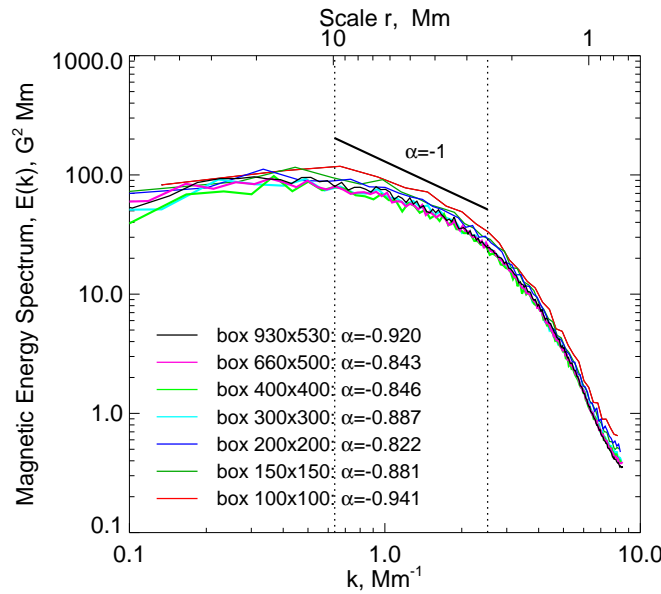
мы выбрали обширную зону невозмущенной фотосферы в центре диска, наблюдавшуюся 19 июня 2017 года, рис. 1. Как видно из рисунка, это область слабых магнитных полей (левый рисунок); SDO/AIA/193 Å изображение солнечного диска (правый рисунок) позволяет предположить, что это зона замкнутых петель, а не корональная дыра. Исследуемая зона  $930 \times 530$  пикселей ( $465'' \times 265''$  или  $340 \times 190$  Мм, прямоугольник на рис. 1) была разбита на участки. На каждом этапе было выделено 25 участков со сдвигом, так, чтобы перекрыть всю зону. На первом этапе выделялись участки размером  $100 \times 100$  пикселей, на втором –  $150 \times 150$  пикселей и т. д., с возрастанием размера до максимального. Данные о размерах участков и параметров магнитного поля в них приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Параметры участков невозмущенной фотосферы по наблюдениям 19 июня 2017 года

| Размер, пикс.    | $(\langle B_z^2 \rangle)^{1/2}$ , Гс | $F/(10'' \times 10'')$ , $10^{18}$ Мх | $\alpha$           |
|------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| $100 \times 100$ | $21.6 \pm 18$                        | $3.80 \pm 0.9$                        | $-0.942 \pm 0.077$ |
| $150 \times 150$ | $20.3 \pm 15$                        | $3.68 \pm 0.6$                        | $-0.881 \pm 0.080$ |
| $200 \times 200$ | $19.9 \pm 14$                        | $3.62 \pm 0.5$                        | $-0.822 \pm 0.067$ |
| $300 \times 300$ | $18.6 \pm 11$                        | $3.50 \pm 0.3$                        | $-0.887 \pm 0.060$ |
| $400 \times 400$ | $18.0 \pm 8$                         | $3.48 \pm 0.2$                        | $-0.846 \pm 0.040$ |
| $660 \times 500$ | $18.5 \pm 4$                         | $3.51 \pm 0.03$                       | $-0.843 \pm 0.031$ |
| $930 \times 530$ | 19.0                                 | 3.53                                  | -0.920             |

В таблице показаны усредненные по 25-ти участкам данного размера параметры поля и спектра, величина стандартного отклонения указана в скобках. Так, во втором столбце представлена средне-квадратичная величина плотности магнитного потока  $(\langle B_z^2 \rangle)^{1/2}$ ; в третьем – удельная величина беззнакового магнитного потока  $F$  (вычисленного как сумма абсолютных величин потоков в пикселях участка), отнесенная к площадке  $10'' \times 10''$ . И в последнем столбце приведен спектральный

индекс  $\alpha$ , вычисленный как наклон спектра мощности в интервале (2.5–10) Мм. Сами спектры мощности, также усредненные по 25-ти участкам одинакового размера, приведены на рис. 2. Данные таблицы 1 показывают, что при малых размерах пробного участка (100–200 пикселей), среднеквадратичная плотность потока и поток на единицу площади оказываются завышенными. Плотность потока завышена на (8–17) % и в среднем на 11 %, а поток – на (3–8) % и в среднем на 5 %. Рассмотрение участков размером более чем  $300 \times 300$  пикселей дает устойчивую картину оценок. Мы полагаем, что наблюдаемое при малых размерах участка завышение имеет искусственное происхождение и связано с невозможностью распределить часть мощности на масштабы больше, чем 100 пикселей. Сравнительно малая статистика данных тоже, по-видимому, вносит вклад в отклонение спектров по малому и большому участкам.



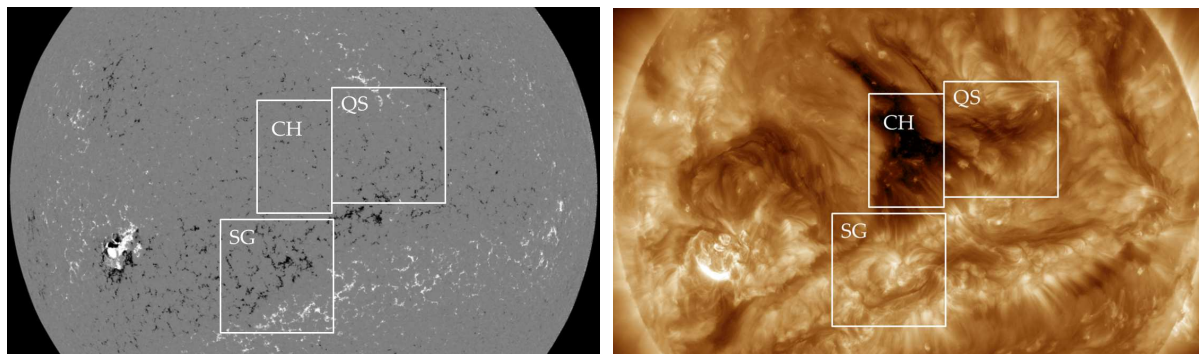
**Рис. 2.** Спектры мощности, усредненные по 25-ти участкам одинакового размера. Вертикальные пунктирные отрезки охватывают интервал (2.5–10) Мм, внутри которого вычислялся наклон спектра мощности  $\alpha$

Спектр мощности (рис. 2) показывает слегка завышенную мощность для самого малого участка. По мере расширения участка спектр последовательно понижается. Но начиная с размера  $300 \times 300$  пикселей и более спектр очень слабо меняется по высоте, т. е. с незначительными вариациями мощность по частотам не меняется. При этом наклон спектра, вычисленный в традиционном интервале (2.5–10) Мм, варьируется в пределах  $\langle \alpha \rangle \pm 1.5\sigma = -0.877 \pm 0.064$ . Тенденция уменьшения наклона также видна на первых трех участках малого размера. Сравнение со спектром  $E(k) \sim k^{-1}$  показывает, что наклон  $-1$  хорошо выдерживается в более узком интервале, например (2.5–7) Мм. Причина этого, по-видимому, в том, что в рассматриваемой зоне очень слабого поля супергрануляционная сетка магнитного поля не проявляется и магнитных элементов размером более 7 Мм крайне мало. В целом, наклон спектра мощности слабо зависит от охвата области.

#### 4 Спектр мощности в разных магнитных областях невозмущенной фотосферы

Чтобы исследовать, как меняется спектр мощности в невозмущенной фотосфере при переходе от самой слабой, как правило, магнитной зоны – корональной дыры – к зоне спокойного Солнца и затем к наиболее сильной зоне супергрануляционной сетки, мы выбрали данные для 10 марта 2015 года

(рис. 3). На рисунке участок корональной дыры обозначен как CH, участок спокойной фотосферы – как QS и участок поздней стадии распада активных областей NOAA 12242–12259, существовавших на этом месте 3–4 оборота назад, как SG – область повышенной супергрануляции.



**Рис. 3.** SDO/HMI-магнитограмма (слева) и SDO/AIA/193 Å изображение солнечного диска, полученные 3 марта 2015 года в 01:13 UT. Прямоугольниками обозначены исследуемые области невозмущенной фотосферы: CH – область корональной дыры; QS – область спокойного Солнца; SG – область повышенной супергрануляционной сетки

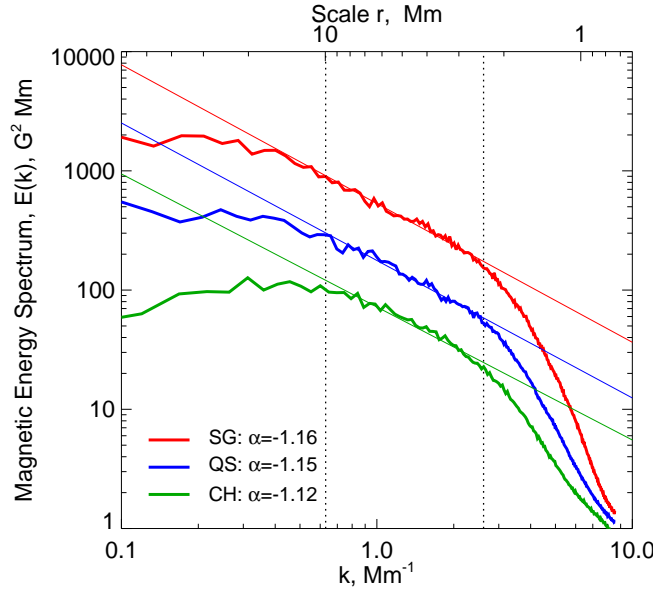
Для повышения точности оценок мы выбрали 11 магнитограмм, полученных через каждые 12 минут в течение двух часов, от 00:00 до 02:00 UT. Затем спектры и параметры поля были усреднены по 11 магнитограммам. Используя изложенную в предыдущем разделе методику, мы вычислили среднеквадратичную плотность магнитного потока  $\langle B_z^2 \rangle^{1/2}$ , удельную величину беззнакового магнитного потока  $F$ , отнесенную к площадке  $10'' \times 10''$ , и спектральный индекс  $\alpha$ . Результаты приведены на рис. 4 и в таблице 2.

Мы видим, что на всех спектрах появляется плавный “завал” на волновых числах  $k \approx 2.5 \text{ Мм}^{-1}$ , что соответствует линейному масштабу  $r = 2\pi/k \approx 2.5 \text{ Мм}$ . Согласно Abramenko et al. (2001), искусственное понижение мощности в высокочастотном конце спектра (т. е. на малых масштабах) начинает проявляться на масштабах примерно в 2.5–3 раза больших, чем предел разрешения телескопа. Для внеатмосферного инструмента SDO/HMI этот предел соответствует дифракционному пределу. Дифракционный предел инструмента SDO/HMI составляет

$$\Theta = 1.22 \cdot 0.0206 \frac{\lambda}{D} = 1.11'' = 0.803 \text{ Мм}. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda = 617.3$  – длина волны наблюдений в нанометрах,  $D = 14$  – диаметр телескопа в сантиметрах. Постоянная 1.22 следует из критерия Рэлея для дифракционного предела оптической системы. Масштаб, втрое превосходящий  $\Theta$ , составит примерно 2.4 Мм, что весьма близко к оцененной по спектру величине 2.5 Мм. Поэтому можно считать, что наблюдаемое понижение мощности на масштабах  $r < 2.5 \text{ Мм}$  имеет искусственное происхождение и связано с недостаточной чувствительностью и низким разрешением инструмента. Форма спектра на масштабах более 2.5 Мм представляется достоверной.

Из рис. 4 следует, что при переходе от самой слабой к более сильным магнитным зонам (т. е. от CH к QS и к SG), спектр поднимается (мощность нарастает на всех частотах) и вытягивается в сторону низких частот, т. е. больших масштабов. Последнее обусловлено, вероятно, тем, что в структуре поля начинает проявляться супергрануляция, масштаб которой достигает 30 Мм. Но самым неожиданным и интересным, на наш взгляд, является постоянство наклона спектра для всех зон. Спектр остается близок к неколмогоровскому  $E(k) \sim k^{-1}$  и параметры магнитного потока нарастают при переходе от CH к QS и к SG (см. таблицу 2).



**Рис. 4.** Спектры мощности магнитного поля для трех участков невозмущенной фотосферы, показанных на рис. 3. Нижний спектр соответствует корональной дыре, CH, средний – области спокойного Солнца, QS, и верхний – зоне повышенной супергрануляции, SG. Тонкие прямые линии показывают наилучшее линейное приближение к данным внутри интервала (2.5–10) Мм. Интервал отмечен вертикальными пунктирами

**Таблица 2.** Параметры участков невозмущенной фотосферы по наблюдениям 3 марта 2015 года

| Область | $(\langle B_z^2 \rangle)^{1/2}$ , Гс | $F/(10'' \times 10'')$ , $10^{18}$ Мх | $\alpha$           |
|---------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| CH      | $19.5 \pm 5$                         | $3.74 \pm 0.06$                       | $-1.116 \pm 0.039$ |
| QS      | $33.4 \pm 4$                         | $5.87 \pm 0.04$                       | $-1.153 \pm 0.023$ |
| SG      | $63.0 \pm 8$                         | $11.43 \pm 0.08$                      | $-1.163 \pm 0.022$ |

## 5 Заключение

Исследование спектров мощности магнитного поля в невозмущенной фотосфере Солнца позволило получить результаты двух типов: методологического и физического. Методологический результат можно сформулировать следующим образом.

- Для достоверной оценки спектра мощности в обширной зоне квазиравномерного распределения поля следует выбирать участок длиной не менее 300 пикселей. По оценкам по меньшему участку мощность на всех доступных частотах оказывается завышенной; среднеквадратичная плотность потока завышается в среднем на 11 %, а удельный беззнаковый поток – на (3–8) % и в среднем на 5 %.

Физические выводы.

- Для магнитных зон разной интенсивности, а именно для корональной дыры, спокойного Солнца и супергрануляционной сетки, спектр мощности магнитного поля проявляет одинаковый спектральный индекс, близкий к  $-1$ . Спектр более пологий, чем колмогоровский, и отличается от более крутых спектров активных областей (см., например, Abramenko and Yurchyshyn, 2010).
- Такой спектр нельзя объяснить только прямым колмогоровским каскадом с наклоном  $-5/3$ , как это предлагает Stenflo (2012). Его можно объяснить дополнительной накачкой магнитной

энергии за счет мелкомасштабного турбулентного динамо (Karak and Brandenburg, 2016). При этом накачка идет, по-видимому, в широкой полосе масштабов: от десятков мегаметров до, по крайней мере, 2.5 Мм. На масштабах менее 2.5 Мм SDO/HMI-данные не позволяют адекватно оценить форму спектра, поэтому мы не исключаем, что турбулентное динамо работает и на меньших масштабах.

- Данные позволяют заключить, что однообразный механизм мелкомасштабного турбулентного динамо работает по всей поверхности Солнца вне активных областей. Этот вывод качественно совпадает с результатами Ishikawa and Tsuneta (2009).

Несомненно, трехмерная организация магнитного поля над фотосферой разная в корональной дыре и в области спокойного Солнца: существенная часть потока сконцентрирована в открытых полях в СН и в закрытых низких петлях в спокойных зонах (см., например, Hofmeister et al., 2019). Наши исследования показывают, что, несмотря на столь существенные различия в 3D-конфигурации над фотосферой, механизмы генерации под фотосферой весьма схожи и представляют собой, по-видимому, генерацию магнитного потока подфотосферной турбулентной средой на разных масштабах: от наименьшего наблюдаемого в СН к большим в QS и SG.

Отметим, что по исследованию солнечного ветра на расстоянии 1 АЕ (Kiyani et al., 2015) низкочастотный диапазон, отражающий солнечную переменность, дает наклон спектра мощности равный  $-1.00 \pm -0.04$ , что совпадает с найденным здесь значением  $-1.1$  для невозмущенных областей. Трудно найти аргументы в пользу случайности совпадения: в обоих случаях присутствует общий агент – магнитное поле Солнца.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность референту за поддержку и интерес к статье, за ряд полезных замечаний. Работа частично поддержана грантом РФФИ 17-02-00049.

## Литература

- Абраменко В.И., 2016. Турбулентная и мультифрактальная природа солнечного магнетизма (Дис. докт. физ.-матем. наук). Научный. [Abramenko V.I., 2016. Turbulent and multi-fractal nature of solar magnetism (Dr. Sci. thesis). Nauchny. (In Russ.)]
- Колмогоров А.Н., 1941. Доклады Акад. наук. Т. 30. С. 301. [Kolmogorov A.N., 1941. Doklady Akad. nauk, vol. 30, p. 301. (in Russ.)]
- Abramenko V., Yurchyshyn V., Wang H., Goode P.R., 2001. *Solar Phys.*, vol. 201, p. 225.
- Abramenko V.I., 2005. *Astrophys. J.*, vol. 629, p. 1141.
- Abramenko V.I., Yurchyshyn V.B., 2010. *Astrophys. J.*, vol. 722, p. 122.
- Dikpati M., Gilman P.A., 2006. *Astrophys. J.*, vol. 649, p. 498.
- Hewett R.J., Gallagher P.T., McAteer R.T.J., et al., 2008. *Solar Phys.*, vol. 248, p. 311.
- Hofmeister S.J., Utz D., Heinemann S.G., Veronig A., Temmer T., 2019. *Astron Astrophys.*, vol. 629, p. 22.
- Ishikawa R., Tsuneta S., 2009. *Astron Astrophys.*, vol. 495, p. 607.
- Jin C.L., Wang J.X., Zhao H., 2011. *Astrophys. J.*, vol. 731, p. 37.
- Karak B.B., Brandenburg A., 2016. *Astrophys. J.*, vol. 816, p. 28.
- Katsukawa Y., Orozco Suarez D., 2012. *Astrophys. J.*, vol. 758, p. 139.
- Kiyani K.H., Osman K.T., Chapman S.C., 2015. *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 373, id. 20140155, doi:10.1098/rsta.2014.0155.
- Stenflo J.O., 2012. *Astron. Astrophys.*, vol. 547, p. A93.
- Toriumi S., Wang H., 2019. *Living Rev. Sol. Phys.*, vol. 16, no. 1, p. 3.
- Upton L., Hathaway D., 2014. *Astrophys. J.*, vol. 780, p. 5.
- Wang Y.-M., Nash A.G., Sheeley N.R., 1989. *Jr. Science*, vol. 245, no. 4919, pp. 712–718.