

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ФОТОСФЕРОЙ И КОРОНОЙ

Абраменко В.И.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

COUPLING BETWEEN PHOTOSPHERE AND CORONA

Abramenko V.I.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

Time variations of parameters of turbulence (magnetic power spectrum, correlation length, and multi-fractality spectrum) for the photospheric magnetic field in a complex active region (AR NOAA 13354) during its passage across the solar disk were calculated and compared with the flare activity timing. A question is: was there any offprint of a strong flare in the time profiles of the measured parameters? We found that no strong abrupt changes in the turbulent and multi-fractal time variations were observed neither before, nor after the flare. Smooth variations in the parameters reflect the common restructuring of the field. At the same time, statistical studies show that more complex ARs demonstrate higher level of turbulence/multi-fractality and higher flaring. So, we might suggest that the photosphere achieves some level of turbulence that ensure its flaring potential, and further operates as “slow-driving mechanism” independently from the self-organized critical state in the corona. Our future efforts to discover ways of energy/information exchange between the photosphere and the corona could be focused on: careful investigations of magnetic field and plasma between the photosphere and chromosphere; further progress in observations of small-scale features; applications of the neural network techniques.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-3-8>

Поверхность Солнца – очень тонкая фотосфера. На ней иногда видны темные пятна, медленно меняющиеся, живущие до нескольких недель. А выше – огромная протяженная и очень быстро меняющаяся корона. Разные масштабы, разные скорости, разные физические условия (температура, плотность, давление) – и, тем не менее, все это составляет единую систему. Как осуществляются связи в такой системе, как передается энергия/информация от одной части к другой? До сих пор остается открытым вопрос, каким образом это происходит, какие явления и на каких пространственно-временных масштабах обеспечивают обмен энергией между плавно меняющимися фотосферными структурами и бурно развивающимися событиями в короне. Единственным связующим звеном-агентом является магнитное поле, система его силовых линий, простирающихся из подфотосферных слоев в корону. Что нам уже известно о связях фотосферы и короны? Из наблюдений известно, что иногда имеет место отклик фотосферы на взрывные процессы в короне. Это и хорошо известные белые вспышки [1, 2], и солнцетрясения [3]. Менее известны работы об изменении фотосферного поля в пятнах во время вспышки. В 2000-х группа уче-

ных из New Jersey Institute of Technology [4, 5] обнаружила, что за время вспышки фотосферное поле в пятне может заметно измениться: поле становится более вертикальным, что авторы объясняют изменением его наклона в результате пересоединения в короне. Позднее, в 2015 появилась работа [6], где авторы показали, что самые сильные изменения магнитного поля в пикселях происходят в местах, куда проектируются компактные источники жесткого рентгеновского излучения, обусловленного вспышкой в короне, причем пик в фотосфере может как опережать, так и запаздывать относительно пика в короне. Авторы интерпретируют результат как отклик в фотосфере на формирование токового слоя в короне и последующего пересоединения силовых линий.

Вопрос об обратной связи – снизу вверх – остается менее проработанным. Кроме гипотетической концепции, что наблюдаемое усиление магнитного потока и увеличение площади пятен обусловлено подъемом магнитных трубок, других наблюдательных доказательств о переносе материи (энергии) от фотосферы вверх нет. Передача энергии различными типами МГД волн очень широко разработана и успешно применяется для объяснения нагрева протяженной квази-однородной короны [7–9] и ускорения солнечного ветра [10] на огромных масштабах, но вряд ли она способна объяснить накопление и спонтанное выделение энергии во вспышках. Тут явно задействовано магнитное поле, причем не только его величина, но и его топологические особенности как в фотосфере, так и в короне. Давно считается общепринятым, что энергия вспышек – это свободная магнитная энергия в короне, а приток этой энергии поступает из фотосферы. Встает вопрос: как это происходит?

Принято считать, что петельные структуры, видимые в ультрафиолетовом излучении, в короне над активной областью (АО) ориентированы вдоль магнитного поля. Фильмы, полученные в UV-линиях на станции SDO, демонстрируют высокую нестационарность и квази-взрывной характер излучения в короне. В то же время, изменения в магнитной структуре фотосферы на тех же временных интервалах (скажем, порядка нескольких часов) оказываются едва заметными. Как бурный характер коронального поля сосуществует с медленно меняющимся фотосферным полем? Есть ли в фотосфере отголоски той само-организованной критичности (SOC), которая довлеет в короне [11, 12]?

Для ответа на вопрос уместно вспомнить, что плазма в фотосфере пребывает в состоянии турбулентности. Следовательно, к ней и ее атрибутам (в том числе и к магнитному полю) применимы методы анализа турбулентных сред. Самая удобная характеристика турбулентности – это спектр мощности $E(k)$ и его наклон α . Спектры мощности магнитного поля в фотосфере исследуются давно. Другой полезный параметр для исследования

степени мульти-фрактальности среды – это флэтнесс-функция $F(r)$ поля, определяемая как отношение шестой структурной функции к кубу второй структурной функции [13]. Наклон флэтнесс-функции k , в двойном логарифмическом масштабе определяет степень мульти-фрактальности поля (степень перемежаемости): чем круче $F(r)$, тем более сложное поле. Отметим, что $E(k)$ и $F(r)$ – это функции, описывающие поведение второго и шестого статистических моментов поля, соответственно. Согласно [14], у последней больше шансов выявить высокой степени перемежаемости, а следовательно, и SOC.

До сих пор эти методы применялись для статистических исследований АО и показали неплохие результаты. В частности, в работах [15, 16] на статистическом материале было показано, что чем круче спектр мощности продольной компоненты поля B_z , тем выше уровень вспышечной продуктивности АО. Аналогичный вывод был сделан в [17] по результатам флэтнесс-функции продольного поля. В данной работе была сделана попытка на примере одной АО проследить, как меняются эти показатели при развитии АО и при запуске единственной мощной вспышки.

Анализ проведен для АО NOAA 13354, данные о магнитном поле были получены прибором HMI на станции SDO с 27 июня по 1 июля 2023 г. Использовались магнитограммы продольного поля `hmi.sharp_cea_720s.magnetogram` с интервалом 12 минут. Всего было проанализировано 599 магнитограмм. Для отслеживания активности в короне, использовались изображения АО в линиях 1600Å и 171Å, полученные инструментом SDO/AIA и данные GOES-18. АО 13354 удобна для изучения тем, что она появилась и быстро развилась до ММК-класса В3, была хорошо изолированной (практически одна на диске) и дала единственную свою мощную вспышку М3.8, когда находилась вблизи центрального меридиана (на W13). Таким образом, в пределах 1–2 суток до вспышки и после вспышки данные о магнитном поле уверенные. На рис. 1 показана магнитограмма АО (слева) и изображение в линии 1600Å во время вспышки. Соответствующие синхронные фильмы развития событий в магнитном поле и в линиях 171Å и 1600Å показывают, что во время вспышки никаких заметных изменений в фотосферном поле не происходит. Заметное и быстрое всплытие магнитного потока в виде δ -структуры происходит примерно через сутки после вспышки (с полудня 30.06.2023). Но в короне этот процесс ничем заметным не выделяется на фоне мелких вспышек.

Временные изменения индекса спектра мощности α и индекса мульти-фрактальности k показаны на рис. 2. Спектральный индекс α меняется очень слабо, оставаясь на уровне Колмогоровского индекса $-5/3$ (пунктирная прямая), что свидетельствует о стационарном режиме развитой турбулентности. Момент вспышки никак не выделен.

Вариации индекса κ показывают, что фрактальные свойства выявляют долгие периоды постоянства с довольно резкими переходами в другой режим. И опять момент перехода (примерно после полудня 30.06.2023) не привязан к вспышке, а скорее к всплытию δ -структуры и перестройке магнитного поля.

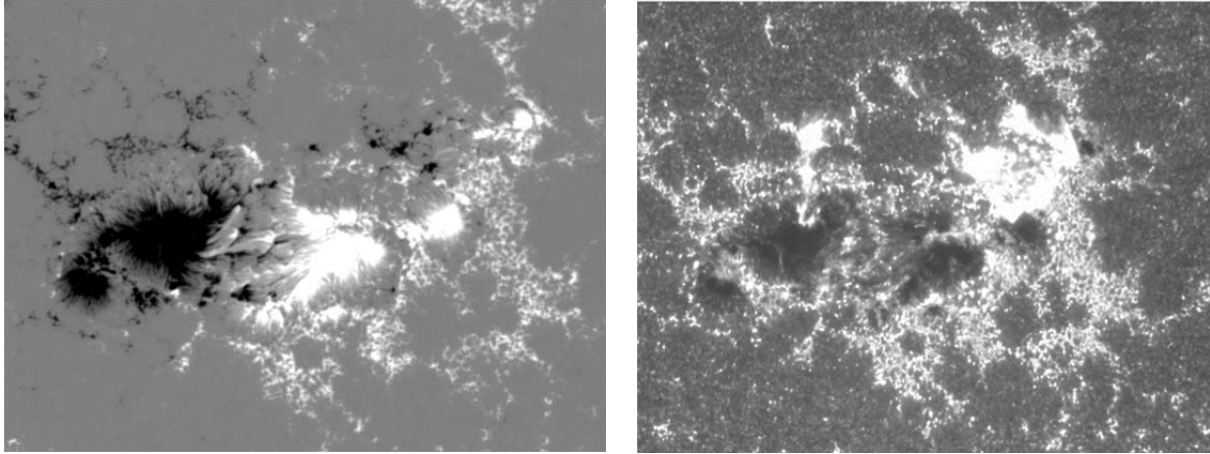


Рис. 1. Слева – SDO/HMI магнитограмма АО NOAA 13354 в момент начала вспышки M3.8 (29.06.2023/14:00UT). Магнитограмма масштабирована от -800 гаусс (черное) до $+800$ гаусс (белое). Север вверху, запад справа. Справа – изображение АО (в картинной плоскости) в линии SDO/1600Å во время максимума вспышки, в 14:14:53UT.

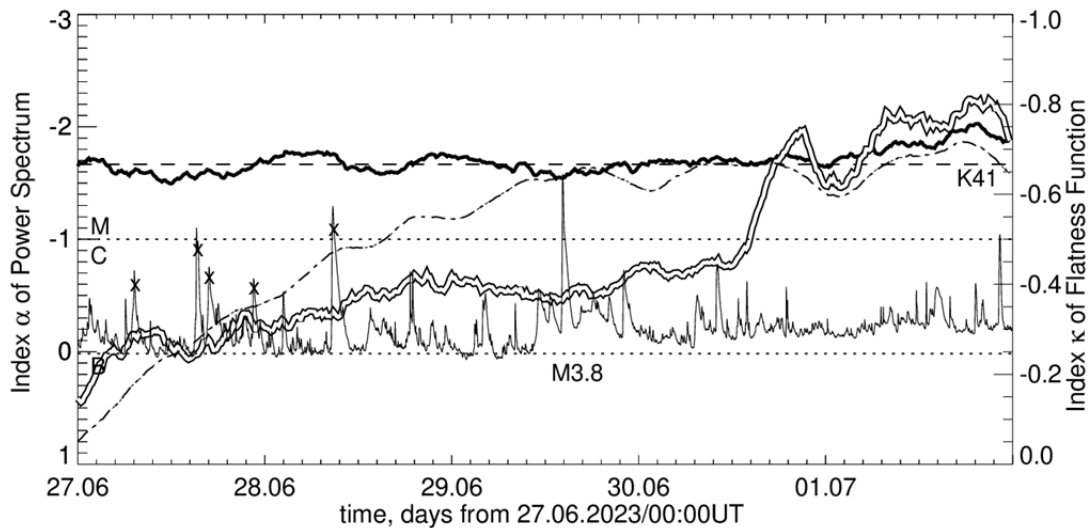


Рис. 2. Изменения степенного индекса α спектра мощности магнитного поля (жирная линия) и степенного индекса κ флэтнесс-функции магнитного поля (двойная линия). Пунктирная линия K41 – индекс Колмогоровского спектра $-5/3$. Штрих-пунктирная линия – изменения беззнакового магнитного потока от 2 до 5×10^{22} Мх. Тонкая линия показывает рентгеновский поток 1–8Å со спутника GOES-18. Крестиками обозначены вспышки в других АО. M3.8 – максимальная вспышка АО 13354 (N17 W13) – происходит на фоне плоских участков в α - и κ -индексах. Процесс всплытия и развития δ -структуры (после полудня 30.06.2023) отражается как подъем κ -индекса (укручение спектра), т.е. усиление фрактальности поля, но не сопровождается вспышками.

Итак, фрактальные и турбулентные свойства поля выявляют долгие периоды постоянства с плавными переходами в другой режим. Момент перехода не привязан к вспышке, а скорее к всплытию и перестройке потока. Из предыдущих исследований известно, что для большого количества АО существует статистическая связь между турбулентными (и другими) параметрами поля и вспышечной продуктивностью. Можно заключить, что фотосферное магнитное поле развивается в состоянии само-организации (мульти-фрактальность), квази-стационарно в состоянии развитой турбулентности, но делает это на том уровне своих турбулентных возможностей, которые обеспечат ему наблюдаемую вспышечную продуктивность в короне. Имеет место информационный разрыв с короной.

Для дальнейшего продвижения нам необходимо изучать переходный слой фотосфера–хромосфера; идти глубже в структуры мелких масштабов (до 100 м); возможно, привлекать методы нейросетей.

Литература

1. *Babin A.N., Baranovskij E.A., Koval' A.N.* Studies of the atmospheric structure of the solar white-light flare of August 9, 2011 // *Astron. Rep.* 2016. Vol. 60, pp.768-775.
2. *Hudson H.S.* Chasing White-Light Flares // *Solar Physics.* 2016. Vol. 291. pp 1273-1322.
3. *Donea A.* Seismic Transients from Flares in Solar Cycle 23 // *Space Sci. Rev.* 2011. Vol. 158, pp. 451-469.
4. *Chen W.Z., Liu C., Song H., et al.* A statistical study of rapid sunspot structure change associated with flares // *Chin. J. Astron. Astrophys.* 2007. Vol.7, pp. 733-742.
5. *Wang H.M., Liu C., Jing J., Yurchyshyn V.* Successive flaring during the 2005 September 13 eruption // *ApJ.* 2007. Vol.671, pp.973-977.
6. *Burtseva O., Martinez-Oliveros J.C., Petrie G.J.D., Pevtsov A.A.* Hard X-Ray Emission During Flares and Photospheric Field Changes // *ApJ.* 2015. Vol.806, pp. 173-189.
7. *Bingham R., Shukla P.K., Eliasson B., Stenflo, L.* Solar coronal heating by plasma waves // *Journal of Plasma Physics.* 2010. Vol. 76, pp. 135-158.
8. *Stangalini M., Berrilli F., Del Moro D., Egidi A., et al.* Coupling photosphere and chromosphere through plasma waves // *Mem. S. A. It.* 2010. Vol. 81, pp.806-809.
9. *Verdini A., Grappin R., Velli M.* Coronal heating in coupled photosphere-chromosphere-coronal system: turbulence and leakage // *A&A.* 2012.Vol.538, pp.70-85.
10. *Ofman L.* Acceleration and heating of solar wind ions by nonlinear waves // *Advances in Geoscience.* Vol. 2: (Solar Terrestrial). Published by World Scientific. 2010, pp. 1–20.
11. *Watkins N.W., Prussner G., Chapman S.C., et al.* 25years of self-organized criticality: Concepts and controversies // *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 198, pp. 3-44.
12. *McAteer R.T.J., Aschwanden M.J., Dimitropoulou M., et al.* 25years of self-organized criticality: Numerical Detection Methods // *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 198, pp.217-266.
13. *Abramenko V.* Multifractal analysis of solar magnetograms // *Solar Phys.* 2005. Vol. 228, pp. 29-42.
14. *Frisch U.* / *Turbulence, The Legacy of A.N. Kolmogorov*, Cambridge University Press, 1995.

15. *Abramenko V.* Relationship between magnetic power spectrum and flare productivity in solar active regions // *ApJ*. 2005. Vol. 629, pp. 1141-1149.
16. *Abramenko V., Yurchyshyn V.* Magnetic energy spectra in solar active regions // *ApJ*, 2010. Vol. 720, pp. 717-722.
17. *Abramenko V., Yurchyshyn V.* Intermittency and multifractality spectra of the magnetic field in solar active regions // *ApJ*. 2010. Vol. 722, pp. 122-130.