

МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОСФЕРЫ КАК СИСТЕМЫ С САМООРГАНИЗАЦИЕЙ

Абраменко В.И.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

MAGNETIC STRUCTURES IN THE SOLAR PHOTOSPHERE AS SYSTEMS WITH SELF-ORGANIZATION

Abramenko V.I.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-3-6>

For a variety of spatial and temporal scales, magnetic structures on the solar surface display a property of self-organization: super-granulation network, spatio-temporal distribution of sunspots (the butterfly diagram), the 22-year solar cyclicity, etc. Self-organization is a natural state for turbulent systems which the solar magnetized plasma belongs to. A very important subset of systems with self-organization is the systems with self-organized criticality (SOC). In such systems, spontaneous strong fluctuations occupied nearly the entire system (in space domain), and/or long-lasting eruptions (in time domain) are observed. This means the presence of long correlation, which can be diagnosed by the power-law heavy-tailed correlation function. We analyzed correlation functions of magnetic field of solar active regions (ARs). The ARs of different magneto-morphological structure were explored. It was found that the magnetic field structures of ARs do not possess the SOC-property, being self-organized only.

Магнитное поле Солнца, сгенерированное динамо-процессом, находится в состоянии постоянного само-возобновления. С одной стороны, глобальная природа магнитного поля Солнца как звезды создает условия для глобального упорядоченного поведения поля, которое выражается в цикличности активности солнца. Но этот циклический процесс действует в условиях турбулентности конвективной зоны, фотосферы, верхней атмосферы. А любая турбулентная среда – это система с самоорганизацией (возможность спонтанно создавать упорядоченные структуры из хаоса более мелких подсистем), с неизбежной перемежаемостью в пространстве и во времени (длительные промежутки низкой активности перемежаются с короткими промежутками высокой), с негауссовыми функциями распределения параметров, с фрактальными признаками и т.д., см., например, [1–3]. Эти свойства магнитного поля будут определять и природу флуктуаций поля, а флуктуации поля, в свою очередь, – это ключевой ингредиент работы динамо. В этой связи выявление свойств самоорганизации магнитных полей, особенно в различных условиях по пространству и времени, представляет собой не только познавательный интерес, но и открывает возможности поиска и проверки критериев для динамо-моделей.

Важным подмножеством систем с самоорганизацией являются системы с самоорганизованной критичностью [4] (self-organized criticality, SOC). Это системы, для которых характерен спонтанный переход в критическое состояние, когда происходят лавины всех масштабов, вплоть до масштаба всей системы. Примеры таких систем – солнечные вспышки, землетрясения, горные лавины и т.п. В этой связи следует отметить, что в исследованиях Солнца параметры SOC, как правило, измеряются в фотосфере, а вспышка инициируется в короне, и вопрос о том, какова магнитная связь между этими областями, остается пока открытым. Достаточно ли для запуска вспышки самоорганизованной критичности только в короне, а фотосферное поле может оставаться в состоянии только самоорганизации? Или фотосферная структура, не обладающая критическим свойством, не в состоянии дать мощную вспышку в короне? И в целом, обладает ли фотосферное магнитное поле свойствами SOC?

Один из наиболее эффективных способов диагностики самоорганизации и состояния SOC – это анализ корреляционных функций [1], как пространственных, так и временных. Коротко-коррелированные системы не обладают состоянием SOC, а появление длинных корреляций является признаком перехода в состояние SOC. Физические предпосылки уходят корнями в теорию перколяций: протекание перколяционного кластера (критическое состояние) связано со спонтанным образованием лавины масштаба всей системы, т.е. увеличением корреляционной длины до максимального масштаба.

Корреляционные функции в физике Солнца применяются в основном как временные корреляционные функции при изучении турбулентности в гелиосфере. Пространственные корреляционные функции как средство для исследования фотосферных структур до сих пор, по нашим сведениям, применяются крайне редко. Мы решили восполнить этот пробел и исследовать, в каком состоянии, с точки зрения самоорганизации и SOC, находится фотосферное поле активных областей (АО). Подобные проблемы лучше всего рассматривать на контрасте. Поэтому мы выбрали две активные области очень разной магнитной конфигурации. Использовались SDO/HMI магнитограммы sharp_sea_720s [5]. Первая – активная область NOAA 11734 – регулярная АО класса A1 по магнито-морфологической классификации (ММК), предложенной в [6], что означает, что для нее выполняются эмпирические законы теории динамо среднего поля (закон полярностей Хейла, закон Джоя, правило доминирования лидирующего пятна). Кроме того, это область слабой вспышечной активности (самая мощная ее вспышка показала рентгеновский класс C3.4).

Вторая выбранная активная область – NOAA 12192 – это нерегулярная АО, в которой мощный диполь всплыл к северо-западу от большого униполярного пятна, она была классифицирована по ММК как область са-

мого сложного класса, В3. Вспышечная активность ее довольно высокая: 4 вспышки класса X, самая сильная X3.1.

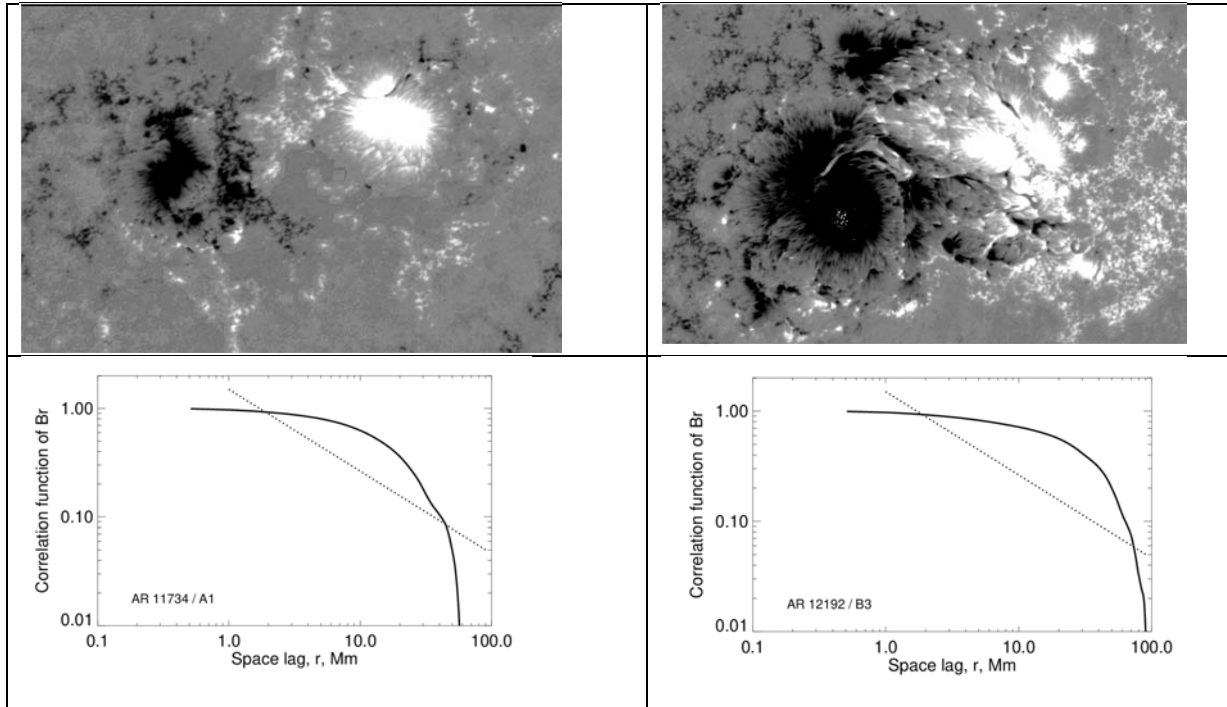


Рис. 1. Вверху: SDO/HMI магнитограммы активных областей NOAA 11734 (MMC-класс A1, 3 мая 2013 г., S18 E09) – слева, и NOAA 12192 (MMC – класс B3, 22 октября 2014 г., S14 E05) – справа. Магнитограммы масштабированы от -1000 Гаусс (черное) до +1000 Гаусс (белое). Север вверху, запад справа. Внизу – нормированные корреляционные функции, вычисленные по магнитограммам. Пунктиром показано поведение произвольного степенного закона в двойном логарифмическом масштабе.

Корреляционная функция $B(r)$ двумерного скалярного поля $u(\mathbf{x})$ вычисляется как функция расстояния r между двумя точками [7]:

$$B(r) = \langle (u(\mathbf{x}+\mathbf{r}) - \langle u \rangle) \cdot (u(\mathbf{x}) - \langle u \rangle) \rangle.$$

Здесь $\mathbf{x} \equiv (x, y)$ – текущая точка на карте, угловые скобки означают усреднение по всей карте. Произведения вычисляются для всех возможных направлений рассматриваемого вектора $\mathbf{r}$, а затем производится усреднение по всем парам точек. Так что корреляционная функция зависит от скалярной величины – рассматриваемого масштаба r . Удобно рассматривать нормированную на $B(0)$ корреляционную функцию, которая уже не зависит от дисперсии и позволяет сравнение разных данных. Именно такие корреляционные функции магнитограмм и показаны на рис. 1.

Неожиданным образом оказалось, что ни та, ни другая активные области не показывают склонности к степенному закону корреляционной функции магнитной структуры. В самом типичном для АО интервале масштабов $\sim(1-100)$ мегаметров они имеют явно выпуклую форму в двойном логарифмическом масштабе, что не согласуется с прямолинейной формой,

характерной для степенного закона. Степенной закон должен выполняться, если есть состояние SOC. Следовательно, мы можем сделать вывод, что магнитные структуры активных областей не обладают свойством самоорганизованной критичности, по крайней мере, это справедливо для fotosферного уровня. Что происходит в магнитном поле короны – вопрос открытый. Зарождение вспышек в хромосферных и корональных полях дает основания надеяться на то, что эти поля могут приходить в состояние SOC.

Литература

1. *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.
2. *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.
3. *Обридко В.Н., Наговицын Ю.А.* Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. – Издательство BBM, 2017. 466 с. Гл. 9.8.
4. *Aschwanden M.J., Scholkmann F., Béthune W, Schmutz W, Abramenko V and 10 co-authors.* Order out of Randomness: Self-Organization Processes in Astrophysics // *Space Sci Rev.* 2018. Vol. 214. pp. 55 – 130.
5. *Bobra M.G., Sun X., Hoeksema J.T., Turmon M., et al.* The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Vector Magnetic Field Pipeline: SHARPs - Space-Weather HMI Active Region Patches // *Solar Physics.* 2014. Vol. 289. pp 3549-3578.
6. *Abramenko V.I.* Signature of the turbulent component of the solar dynamo on active region scales and its association with flaring activity // *MNRAS.* 2021. Vol. 507. No. 3, pp. 3698-3706
7. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Часть 2. – Издательство «Наука». 1967. 720 с.