

СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВСПЛЫВАЮЩИХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

О.К. Куценко, В.И. Абраменко, А.С. Куценко

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Россия, Olga.k.kutsenko@yandex.ru

MAGNETIC POWER SPECTRA OF EMERGING ACTIVE REGIONS

O.K. Kutsenko, V.I. Abramenko, A.S. Kutsenko

Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Russian Federation, Olga.k.kutsenko@yandex.ru

Аннотация. Исследовались магнитограммы четырех всплывающих активных областей. Обнаружено, что на самой ранней стадии всплытия магнитного потока происходит резкое увеличение наклона спектра мощности магнитного поля, что можно использовать для диагностики всплывающего потока на диске Солнца. В целом процесс всплытия идет одновременно в полосе больших масштабов (более 5 Мм). Эпизодически наблюдаются свидетельства кратковременного прямого каскада (энергия с крупных масштабов переходит на мелкие) и обратного каскада (энергия с малых масштабов переходит на большие масштабы).

Ключевые слова: спектр мощности магнитного поля, прямой каскад, обратный каскад.

Abstract. We examined magnetograms of four emerging active regions. The rapid increase of the power spectrum slope during the initial stages of emergence was revealed. This feature might be used for diagnostics of magnetic flux emergence at the solar disk. As a whole, the process of emergence occurs within a wide range of spatial scales above 5 Mm. The manifestations of a short-term direct cascade (the energy transfer from large scales to low scales) as well as those of inverse cascade (the energy transfer from large scales to low scales) are observed episodically.

Keywords: magnetic power spectrum, direct cascade, inverse cascade.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматриваются изменения магнитного поля всплывающих активных областей. Для получения информации об эволюции активной области на стадии всплытия рассматривались спектры мощности магнитного поля. Этот метод исследования, описанный в [Abramenko et al., 2001; Abramenko, 2005], позволяет оценить распределение энергии магнитного поля по структурам разных размеров, а также перенос энергии между ними.

Согласно одной из теорий, при всплытии магнитного потока происходит слияние малых магнитных структур в большие. Этот процесс получил название обратного каскада [Biskamp, 1993]. В настоящем исследовании поставлен вопрос: является ли рост активной области следствием обратного каскада?

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Для анализа всплытия активных областей использовались магнитограммы продольного магнитного поля, полученные на станции Solar Dynamics Observatory (SDO) [Scherrer et al. 2012] инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI).

Активные области были выбраны таким образом, чтобы была видна фаза спокойного Солнца перед всплытием и фаза всплытия. Исследуемые активные области и области спокойного Солнца были расположены в пределах 30° от центрального меридиана, чтобы минимизировать эффект проекции.

Спектры мощности рассчитывались следующим образом. Вначале вычислялся квадрат преобразования Фурье от двумерной магнитограммы. Полученную двумерную матрицу в координатах волновых чисел интегрировали по кольцам малой толщины. Полученный одномерный спектр мощности использовался для расчета спектрального индекса α . Этот параметр вычисляли как наклон спектра, построенного в логарифмической шкале по волновым числам и мощности, на линейном интервале 2.5–10 Мм. Значения спектрального индекса -1 соответствуют спокойному Солнцу. В активных областях наблюдаются $\alpha = -5/3$ и менее.

Чтобы оценить перераспределение энергии между структурами разных размеров в процессе эволюции активной области, вычисляли частную производную спектра мощности по времени для каждого волнового числа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе исследовались магнитограммы четырех всплывающих активных областей, перечисленных в таблице.

Список исследуемых активных областей и некоторые их характеристики

NOAA номер активной области	Даты исследования	Макс. полный магнитный поток, $\times 10^{22}$ Мкс
11076	29.05.2010 00:00 UT – 03.06.2010 23:48	0,8
11726	18.04.2013 00:00 UT – 21.04.2013 23:48	2,3
11781	26.06.2013 00:00 UT – 30.06.2013 23:48	0,7
12275	24.01.2015 00:00 UT – 28.01.2015 23:48	0,9

Рассмотрим спектры мощности активных областей (рис. 1). До всплытия наблюдался плоский спектр, соответствующий спокойному Солнцу. Всплытие магнитного потока сопровождалось возрастанием энергии одновременно с увеличением наклона спектра.

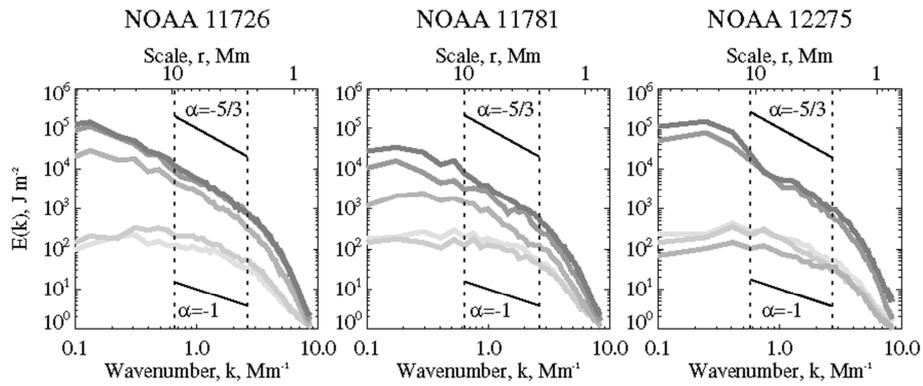


Рис. 1. Спектры мощности активных областей для активных областей NOAA 11726 (слева), 11781 (в центре), 12275 (справа).

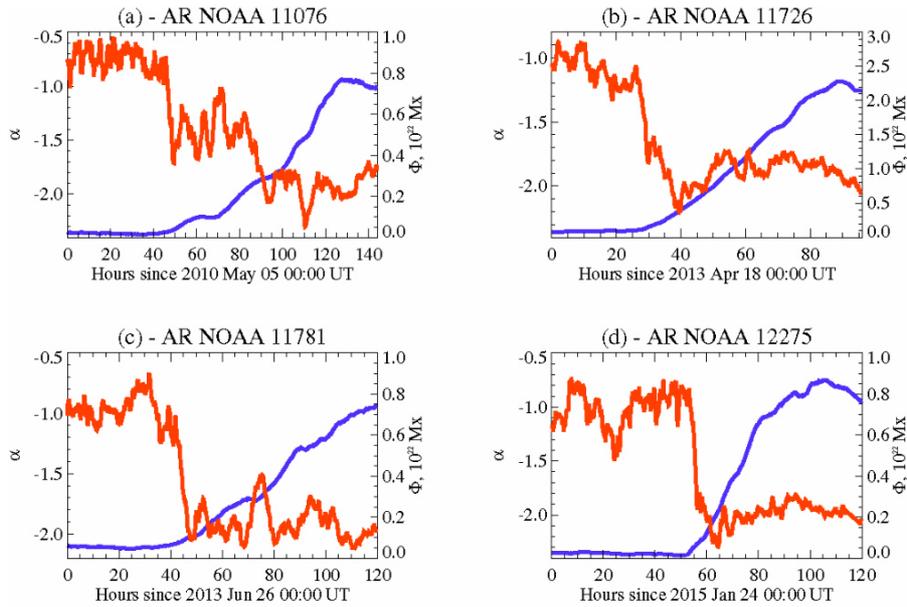


Рис. 2. Спектральный индекс α (красная линия) и полный магнитный поток (синяя линия) активных областей NOAA 11076 (слева сверху), 11726 (справа сверху), 11781 (слева снизу), 12275 (справа снизу).

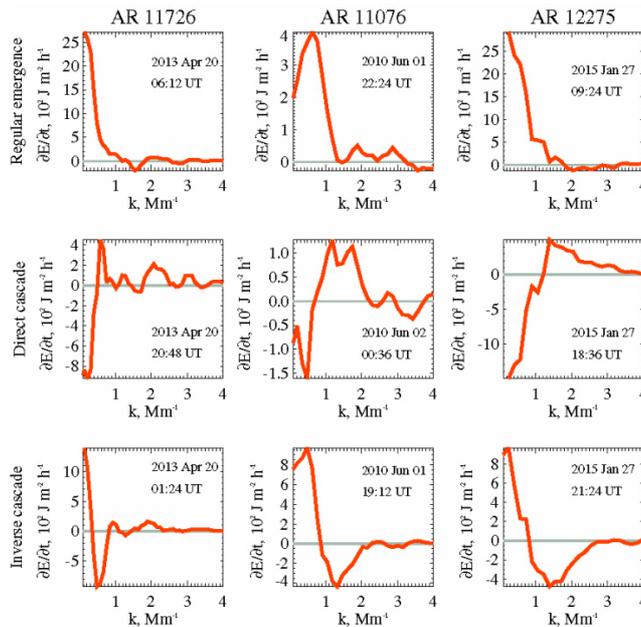


Рис. 3. Частная производная спектра мощности по времени в определённые моменты времени, демонстрирующие три различных режима всплывания: обычное всплывание магнитного потока (верхняя панель), прямой каскад (средняя панель), обратный каскад (нижняя панель) для активных областей NOAA 11726 (левый столбец), 11076 (средний столбец), 12275 (правый столбец).

На рис. 2 показаны изменения спектрального индекса α и полного магнитного потока всплывающих активных областей. Можно увидеть, что появление магнитного потока сопровождалось резким изменением параметра α . Стоит отметить, что резкое изменение спектрального индекса (наклона спектра мощности) наблюдается непосредственно вначале всплытия активной области, когда полный магнитный поток только начинает возрастать. Это свойство спектра мощности можно использовать для диагностики появления активных областей на поверхности Солнца.

Рассмотрим частную производную спектра мощности по времени. Эта функция позволяет оценить изменения энергии на разных масштабах. Было обнаружено, что процесс всплытия имеет неоднородную структуру: прирост энергии сменяется ее убылью и наоборот. Основные изменения энергии сосредоточены на больших масштабах. Это можно увидеть на рис. 3 (верхняя панель): сильное возрастание энергии имеет место на малых волновых числах, которые соответствуют крупным масштабам от 6 Мм. Следовательно, всплытие происходит преимущественно крупными структурами.

Также были обнаружены кратковременные свидетельства прямого и обратного каскадов. Прямой каскад — это перенос энергии от больших масштабов на малые, т.е. этот процесс дробления больших структур. Средняя панель показывает этот процесс: здесь наблюдается уменьшение энергии на малых волновых числах (больших масштабах) с одновременным приростом на больших волновых числах (малых масштабах). Необходимо отметить дисбаланс между приростом и спадом энергии в каскаде: убыль энергии не равна ее приросту. Следовательно, при распаде больших структур не вся энергия переходит в малые, часть ее диссипирует и выводится из системы другими способами. Обратный каскад противоположен прямому. Здесь энергия малых масштабов переходит в большие, т.е. имеет место слияние малых структур в большие. Свидетельства такого процесса представлены на нижней панели: одновременное увеличение энергии на малых волновых числах (больших масштабах) с уменьшением на больших волновых числах (малых масштабах). Здесь также имеет место неравные значения прироста и убыли энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На самой ранней стадии всплытия магнитного потока происходит резкое увеличение наклона спектра мощности магнитного поля, что можно использовать для диагностики всплывающего потока на диске Солнца. В целом процесс всплытия идет одновременно в полосе больших масштабов (более 6 Мм). Эпизодически наблюдаются свидетельства кратковременного прямого каскада (энергия с крупных масштабов переходит на мелкие) и обратного каскада (энергия с малых масштабов переходит на большие масштабы). В целом наблюдаемая картина не подтверждает теорию формирования пятен путем слияния мелких элементов, как основной процесс формирования пятна. Процесс всплытия имеет перемежаемую временную структуру: короткие периоды роста и спада сменяют друг друга, что свидетельствует о турбулентном характере всплывающего магнитного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abramenko V.I. Relationship between Magnetic Power Spectrum and Flare Productivity in Solar Active Regions. *Astrophys. J.* 2005. 629. P. 1141.
- Abramenko V., Yurchyshyn, V., Wang H., Goode P.R. Magnetic Power Spectra Derived from Ground and Space Measurements of the Solar Magnetic Fields. *Solar Phys.* 2001. 201, P. 225.
- Biskamp D. Nonlinear Magnetohydrodynamics. *Cambridge Monographs on Plasma Physics, Cambridge [England]; New York, NY: Cambridge University Press.* 1993. P. 378.
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., Kosovichev A.G., Bogart R.S., Hoeksema J.T., Liu Y., Duvall T.L., Zhao J., Title A.M., Schrijver C.J., Tarbell T.D., Tomczyk S. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. 275. P. 207.