ТУРБУЛЕНТНАЯ ДИФФУЗИЯ МЕЛКОМАСШТАБНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРИ И ВНЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Абраменко В.И.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

TURBULENT DIFFUSION OF SMALL-SCALE MAGNETIC FIELD INSIDE AND OUTSIDE OF ACTIVE REGIONS

Abramenko V.I.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

Recently it was shown that in undisturbed solar photosphere, the magnetic flux dispersal occurs in a regime of super-diffusivity: the index γ of a separation spectrum is in a range of (1.3–1.6) and the turbulent diffusion coefficient η_t grows from ~ 20 to $\sim 300 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ on length scales of 20–6000 km. A situation with diffusivity inside active regions (ARs) remains unexplored. Here we present results of a flux dispersal analysis inside four ARs. The ARs of different stage of evolution and different flaring productivity were analysed using data acquired by Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard the Solar Dynamic Observatory (SDO). We found that the dispersion of small-scale magnetic elements occur in a regime that is close to normal diffusion: the index γ varies in a range of (1.02–1.17) and $\eta_t = (120 - 130) \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ for an AR with $\gamma = 1.02$ and $\eta_t = (145 - 240) \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ for the most “super-diffusive” AR with $\gamma = 1.17$. We conclude that the diffusivity regime does not appear to depend on individual properties of an AR, such as total unsigned magnetic flux, state of evolution, and flaring activity. Small-scale magnetic elements inside the AR area are not representative of the undisturbed photosphere, but they rather intrinsically belong to the whole coherent magnetic structure of an AR and probably are a result of the evolutionary processes in an AR such as flux emergence and dispersion.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-7-10

В серии недавних работ [1–4] было показано, что в невозмущенной фотосфере дисперсия мелкомасштабных магнитных элементов по поверхности Солнца происходит в режиме супер-диффузии. В таком режиме коэффициент турбулентной диффузии η_t возрастает прямо пропорционально (линейному и временному) масштабу, а степенной показатель γ спектра смещений существенно превосходит единицу – значение, характерное для режима нормальной диффузии. Величина γ составляет (1.3–1.6) в невозмущенных областях [1–4], а коэффициент турбулентной диффузии η_t растет от 20 до 300 км² с^{–1} при возрастании масштаба от 20 до 6000 км [2].

Невозмущенные области занимают около 80% поверхности Солнца, и естественно, режим дисперсии поля в них существенно влияет на процессы, связанные с солнечным циклом. При этом вопрос о том, как происходит дисперсия мелкомасштабных магнитных элементов внутри активных областей, остается открытым. Она может происходить в том же режиме,

что и в окружающей невозмущенной фотосфере, но может и существенно отличаться, неся в себе признаки турбулентных процессов на глубинах, где формировалась активная область (АО).

Здесь мы представляем результаты исследования режима турбулентной диффузии в четырех АО с разным уровнем вспышечной активности и на разных стадиях эволюции. На рисунке 1 их магнитограммы показаны в едином масштабе в момент прохождения областей через центральный меридиан.

Рис. 1.

Для каждой АО было взято 240 магнитограмм, по 120 в обе стороны от центрального меридиана. Временной интервал исследований перекрывал двое суток. Магнитограммы были совмещены наилучшим образом с использованием быстрого преобразования Фурье. Собственные движения магнитных элементов (трассеров поля) отслеживались, используя разработанный нами ранее feature tracking code [1]. Магнитные элементы выделялись по порогу 30 Мх см^{-2} и имели площадь от 3 до 100 квадратных пикселей. По данным о траекториях трассеров поля были вычислены спектры разлета в паре трассеров [5], представленные на рисунке 2. По ним получены графики изменения коэффициента турбулентной диффузии η_t в зависимости от временного и пространственного масштаба, Рисунок 3, где для сравнения серой линией показан график η_t для области в корональной дыре, СН, по данным работы [2]. Состояние развития АО (Stable, Emerging) и

уровень вспышечной продуктивности, Flare Index, FI, указаны в скобках на рис. 3.

Рис. 2.

Рис. 3.

Выяснилось, что мелкомасштабные магнитные элементы в АО диффундируют в режиме, более близком к нормальной диффузии по сравне-

нию с невозмущенной фотосферой: показатель γ составляет (1.02–1.17), что существенно ближе к единице, – величине, характерной для нормальной диффузии. При этом η_t возрастает в пределах 120–130 км² с⁻¹ для АО с $\gamma = 1.02$ и в пределах 145–240 км² с⁻¹ для АО с $\gamma = 1.17$. Режим диффузии, по-видимому, не зависит от индивидуальных свойств АО, таких как уровень вспышечной продуктивности, стадия развития, магнитный поток.

Можно заключить, что мелкомасштабные магнитные элементы в АО не являются представителями невозмущенной фотосферы, а принадлежат общей когерентной магнитной структуре, объединенной в активную область. Турбулентные свойства мелкомасштабных магнитных элементов, скорее всего, не связаны с процессами над фотосферой, но несут в себе информацию о подфотосферной динамике замагниченной плазмы.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ-грантов 16-02-00221 А, 17-02-00049 и 17-52-53203.

Литература

1. *Abramenko, V.I., Carbone, V., Yurchyshyn, V.B., et al.* // *Astrophys. J.*, 2011, v. **743**, p. 133-142.
2. *Abramenko, V.I.* // *MNRAS*, 2017, v. 471, p. 3871.
3. *Giannattasio, F., Del Moro, D., Berrilli, F., and 3 co-authors* // *Astrophys. J.*, 2013, v. 770, L36.
4. *Giannattasio, F., Stangalini, M., Berrilli, F., Del Moro, D., Bellot Rubio, L.* // *Astrophys. J.*, 2014, 788, 137.
5. *Lepreti, F., Carbone, V., Abramenko, V. I. and 4 co-authors* // *Astrophys. J.*, 2012, 759, L17.