

ВСПЛЫТИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТЬ СОЛНЦА

А.С. Куценко, В.И. Абраменко

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия
alex.s.kutsenko@gmail.com

MAGNETIC FLUX EMERGENCE TO THE SOLAR SURFACE

A.S. Kutsenko, V.I. Abramenko

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Russia
alex.s.kutsenko@gmail.com

Аннотация. В работе проводится статистическое исследование параметров активных и эфемерных областей, всплывающих на поверхность Солнца. Для работы использовались данные наблюдений инструмента Helioseismic and Magnetic Imager орбитальной обсерватории Solar Dynamics Observatory. Для каждой всплывающей области рассчитывался полный магнитный поток в максимуме развития и скорость нарастания магнитного потока. Сопоставление этих параметров подтвердило, что между максимальным магнитным потоком и скоростью нарастания потока существует степенная зависимость. Интересно, что зависимость сохраняется для активных и эфемерных областей в больших масштабах изменения магнитного потока, что говорит об универсальном механизме всплытия магнитного потока.

Ключевые слова: активные области на Солнце, магнитные поля, всплытие магнитного потока.

Abstract. A statistical study of active and ephemeral region parameters is performed in this work. Magnetic field measurements provided by the Helioseismic and Magnetic Imager onboard the Solar Dynamics Observatory were utilized for analysis. For each emerging region we calculated the peak total unsigned magnetic flux as well as flux emergence rate. Our results confirmed that a power-law relationship exists between these two quantities. Interestingly, the relationship holds for active and ephemeral regions in a vast range of peak magnetic flux implying the existence of generic mechanism of magnetic flux emergence.

Keywords: solar active regions, magnetic field, magnetic flux emergence.

ВВЕДЕНИЕ

Активные области на Солнце возникают в местах выхода магнитного потока на поверхность звезды [Parker, 1955]. Генерация магнитного поля — глобальное динамо — происходит внутри конвективной оболочки Солнца, однако о деталях этого процесса до сих пор ведутся дебаты. Большинство теорий рассматривает узкую зону тахоклина как наиболее вероятное место, где происходит генерация и усиление магнитного поля (см., например, [Charbonneau, 2014]).

Генерируемый магнитный поток под действием некоторых механизмов (например, дифференциальное вращение в совокупности с вмороженностью магнитного поля в плазму) формируется в магнитные жгуты тороидального поля, ориентированного параллельно солнечному экватору. При достижении определенной плотности магнитного потока, вследствие увеличения магнитного давления, внутри жгута уменьшается давление газа и возникает сила магнитной плавучести, которая поднимает магнитный жгут на поверхность Солнца [Vabcock, 1961].

Плотность плазмы внутри конвективной зоны меняется на шесть порядков при подъеме от тахоклина к фотосфере [Cheung et al., 2010]. Вследствие этого поднимающаяся магнитная трубка испытывает сильное расширение при подходе к верхним слоям конвективной зоны. Численные модели, получившие название моделей двухступенчатого всплытия, показывают, что перед появлением на поверхности Солнца магнитная трубка «расплывается» (англ. pancaking) под фотосферой, всплытие прекращается вследствие резкого падения плотности немагнитной плазмы вокруг магнитного жгута [Toriumi, Yokoama, 2010]. После этого «маг-

нитный пласт» поднимается в атмосферу Солнца благодаря ряду неустойчивостей, при этом часть магнитного потока может остаться под поверхностью.

Эфемерные области считаются проявлением локального или турбулентного динамо, т.е. механизма, действующего независимо от цикла солнечной активности и черпающего энергию из конвективных турбулентных движений плазмы [см., например, Brandenburg et al., 2012]. Эфемерными областями условно считаются магнитные диполи с магнитным потоком менее $\sim 10^{20}$ Мкс, которые могут генерироваться в приповерхностном слое.

Модели всплытия магнитного потока предсказывают степенную зависимость между скоростью нарастания магнитного потока при всплытии, R , и максимальным магнитным потоком, Φ_{\max} , в жгуте, $R = \Phi_{\max}^k$. Простая модель всплытия магнитного жгута, разработанная в работе [Otsuji et al., 2011], приводит к значению показателя экспоненты $k=0.5$. Анализ наблюдательных данных подтверждает степенную зависимость $R = \Phi_{\max}^k$, при этом разные авторы получают разные значения показателя экспоненты k и фокусируются на исследовании всплытия либо эфемерных, либо активных областей (например, [Abramenko et al., 2017; Norton et al., 2017]). К тому же, в разных исследованиях используются разные методы для определения R , поэтому сопоставление скоростей нарастания магнитного потока для эфемерных и активных областей, взятых из разных источников, некорректно.

Целью данной работы является определение зависимости $R=F(\Phi_{\max})$ для однородного ряда всплывающих активных и эфемерных областей с различ-

ным магнитным потоком для обнаружения возможного различия в характере их всплытия, вероятно связанного с различными механизмами формирования магнитных жгутов.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использовались данные измерений магнитных полей Солнца, выполненные инструментом Helioseismic and magnetic Imager обсерватории Solar Dynamics Observatory [SDO/HMI, Schou et al., 2012]. Инструмент представляет собой полнодисковый фототрограф с пространственным разрешением 1 угл. сек. Магнитное поле измеряется в фотосферной линии Fe I 6173 Å, магнитограммы размером 4096×406 пикселей с размером пикселя 0.5×0.5 угл. сек. доступны с временным интервалом 720 с.

Для измерения магнитного потока активных областей на магнитограммах продольного поля полного диска вручную выделялись патчи, содержащие саму активную или эфемерную область и участок спокойного Солнца, на котором она всплывает. Методом кросс-корреляции этот же участок выделялся на следующих и предыдущих во времени магнитограммах, устраняя, таким образом, вращение Солнца. Отслеживание области проводилось до тех пор, пока центр патча находился в пределах ±60° от центрального меридиана. Для устранения эффекта проекции выполнялась μ -коррекция (например, [Leka et al., 2017]). Полный магнитный поток рассчитывался как сумма плотностей магнитного потока в пикселях патча, умноженная на скорректированную площадь пикселя. При суммировании учитывались только те пиксели, плотность потока в которых превышала 18 Мкс см⁻¹.

Из графика изменения магнитного потока патча от времени определялся максимальный полный магнитный поток области, Φ_{\max} , как разница между максимальным магнитным потоком в патче и магнитным потоком в патче, который наблюдался перед началом всплытия области. Также определялась средняя скорость нарастания магнитного потока, R , как отношение Φ_{\max} ко времени, в течение которого происходило увеличение магнитного потока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В общей сложности, в анализе были использованы данные для 492 активных и эфемерных областей, наблюдавшихся в течение 2010–2011 гг. Максимальный магнитный поток в выборке менялся в диапазоне (0.02–20)10²¹ Мкс. Зависимость скорости нарастания магнитного потока от максимального магнитного потока показана на рисунке. Видно, что распределение хорошо описывается степенным законом, аппроксимация приводит к значению показателя экспоненты $k=0.55\pm 0.02$. Это значение выше, чем полученное в работе [Abramenko et al., 2017] $k=0.48\pm 0.02$, что может быть связано с расширением диапазона максимального магнитного потока в сторону меньших значений (включение эфемерных областей в выборку). Кроме того, заметен более сильный разброс значений R для эфемерных областей с близкими Φ_{\max} по сравнению с крупными активными областями. По-видимому, при всплытии на слабые эфемерные области большее влияние оказы-

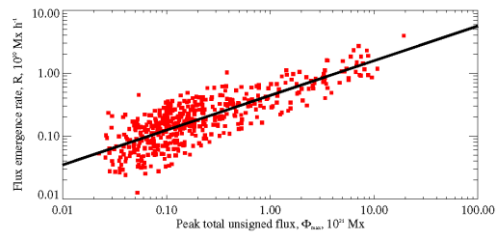


Рис. Зависимость между средней скоростью нарастания магнитного потока, R , и максимальным полным магнитным потоком, Φ_{\max} , активных и эфемерных областей. Черной линией показано наилучшее линейное приближение распределения

вают хаотические турбулентные движения плазмы по сравнению с крупными активными областями.

ВЫВОДЫ

Используя данные измерений магнитных полей инструментом SDO/HMI, мы исследовали зависимость между скоростью нарастания магнитного потока и максимальным магнитным потоком всплывающих активных и эфемерных областей. Результаты показали, что как эфемерные, так и активные области образуют единое распределение $R=F(\Phi_{\max})$, что говорит об универсальном характере всплытия магнитного потока на поверхность Солнца. В то же время, заметен больший разброс значений R для эфемерных областей с близким магнитным потоком по сравнению с крупными активными областями, что может свидетельствовать о существенном влиянии хаотичных движений турбулентной плазмы на мелкомасштабные всплывающие магнитные структуры.

Работа выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ 17-02-00049.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abramenko V.I., Kutsenko A.S., Tikhonova O.I., Yurchyshyn V.B. Analysis of the Flux Growth Rate in Emerging Active Regions on the Sun // *Solar Phys.* V. 292, article id. 48.
- Babcock H.W. The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-YEAR Cycle // *Astrophys. J.* V. 133. P. 572.
- Brandenburg A., Sokoloff D., Subramanian K. Current Status of Turbulent Dynamo Theory. From Large-Scale to Small-Scale Dynamos // *Space Sci. Rev.* V. 169. P. 123–157.
- Charbonneau P. Solar Dynamo Theory // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* V. 52. P. 251–290.
- Cheung M.C.M., Rempel M., Title A.M., Schüssler M. Simulation of the Formation of a Solar Active Region // *Astrophys. J.* V. 720. P. 233–244.
- Leka K.D., Barnes G., Wagner E.L. Evaluating (and improving) estimates of the solar radial magnetic field component from line-of-sight magnetograms // *Solar Phys.* V. 292, article id. 36.
- Norton A.A., Jones E.H., Linton M.G., Leake J.E. Magnetic flux emergence and decay rates for preceder and follower sunspots observed with HMI // *Astrophys. J.* V. 842, article id. 3.
- Otsuji K., Kitai R., Ichimoto K., Shibata K. Statistical Study on the Nature of Solar-Flux Emergence // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* V. 63. P. 1047–1057.
- Parker E.N. The Formation of Sunspots from the Solar Toroidal Field // *Astrophys. J.* V. 121. P. 491.
- Schou J., Scherrer P. H., Bush R.I., et al. Design and ground calibration of the helioseismic and magnetic imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* V. 275. P. 229–259.
- Toriumi S., Yokoyama T. Two-step Emergence of the Magnetic Flux Sheet from the Solar Convection Zone // *Astrophys. J.* V. 714. P. 505–516.