СВЯЗЬ МЕЖДУ СКОРОСТЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА И ДРУГИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВСПЛЫВАЮЩЕЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

Куценко А.С.¹, Абраменко В.И.¹, Певцов А.А.²

¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия*

²*Национальная солнечная обсерватория, Боулдер, Колорадо, США*

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE FLUX EMERGENCE RATE AND OTHER CHARACTERISTICS OF EMERGING ACTIVE REGIONS

Kutsenko A.S.¹, Abramenko V.I.¹, Pevtsov A.A.²

¹*Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia*

²*National Solar Observatory, Boulder, Colorado, USA*

We use 8-year-long SDO/HMI observations to analyze the flux emergence rate of active regions (ARs). In particular, we intend to observationally support the relationship between the flux emergence rate of AR and its averaged twist. All in all, data on 423 emerging ARs were involved in the analysis. We confirmed that the flux emergence rates versus peak fluxes relationship is distributed by a power law with the power law index close to the theoretically predicted value of 0.5. Although there is no obvious correlation between the flux emergence rate and the averaged twist of AR, our results suggest that the averaged twist sets the lower boundary for the emergence rate: more twisted ARs will emerge faster.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-267-270

Введение

Общепринято, что активные области (АО) на Солнце возникают вследствие всплытия на поверхность и далее в корону магнитных жгутов. Магнитные жгуты формируются глобальным динамо в конвективной зоне, однако точные детали этого механизма до сих пор вызывают споры. Поскольку процессы внутри Солнца недоступны для прямых наблюдений, наши знания о них формируются на основе моделей, которые описывают наблюдаемые на поверхности проявления глобального динамо. Именно в момент всплытия магнитный жгут может нести на себе отпечаток тех механизмов, которые были вовлечены в процесс его формирования.

Всплытие магнитных жгутов и формирование АО активно изучается с теоретической стороны. Нельзя не отметить работу [1], в которой проводилось магнитогидродинамическое моделирование всплытия АО из глубины конвективной зоны на поверхность Солнце. Полученные авторами магнитограммы АО имеют прекрасное визуальное сходство с реально наблюдаемыми магнитограммами.

Также немало внимания уделяется анализу наблюдений всплывающих АО. В ряде работ показано, что скорость увеличения магнитного потока

$R = \partial\Phi/\partial t$ и максимальный магнитный поток АО $\Phi_{\max}$ связаны степенным законом

$$R = C\Phi_{\max}^k, \quad (1)$$

где C – некая константа. Разные авторы получают различные значения показателя экспоненты k в выражении (1). Так, Оцудзи и др. [2] при анализе 110 всплывающих АО получили значение $k = 0.57$, в то время как их упрощенная теоретическая модель предсказывала значение $k = 0.5$. Подобные анализы, выполненные Абраменко и др. [3] и Нортон и др. [4], привели к значениям $k = 0.69$ и $k = 0.36$, соответственно. Кроме того, Абраменко и др. [3] показали, что скорость увеличения потока для АО с близким значением $\Phi_{\max}$ может значительно отличаться.

В данной работе мы определяем значение показателя экспоненты k на статистически большой выборке АО. Также мы хотим установить влияние твиста АО на скорость увеличения магнитного потока. Теоретические модели, например [5, 6], предсказывают сильную связь между этими двумя величинами.

Данные и методы

Для данного анализа мы использовали наблюдения инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) космической обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO). Всплывающие АО выделялись на магнитограммах продольного поля полного диска и отслеживались в пределах $\pm 60^\circ$ от центрального меридиана. Для каждой АО рассчитывался ряд параметров, таких как максимальный магнитный поток, $\Phi_{\max}$, тилт АО, θ , и расстояние между средневзвешенными центрами противоположных полярностей АО, d , в момент достижения $\Phi_{\max}$. Средняя скорость увеличения магнитного потока определялась как $R_{av} = \Phi_{\max}/\Delta t$, где Δt – интервал, в течение которого наблюдалось увеличение магнитного потока АО.

Для расчета твиста АО мы применили подход, предложенный авторами работы [7]. Средний по АО твист, α_{av} , определялся с помощью выражения

$$\alpha_{av} = \frac{\sum j_z(x,y)B_z(x,y)}{\sum B_z^2(x,y)}, \quad (2)$$

где j_z и B_z – вертикальные компоненты плотности электрического тока и магнитного поля, соответственно. Для расчета электрического тока использовались наблюдения полного вектора магнитного поля АО в форме SHARP [8]. Суммирование в выражении (2) проводилось только по пикселям, величина магнитного поля в которых превышала 300 Мкс см^{-1} .

Результаты

В общей сложности, в данной работе мы обнаружили 423 АО, которые всплывали на видимом диске Солнца в период с 2010 по 2017 гг. Мак-

симальные магнитные потоки наблюдавшихся АО находятся в интервале $(0.36\text{--}25.3) \cdot 10^{21}$ Мкс.

Результаты расчетов некоторых параметров АО от $\Phi_{\max}$ показаны на рис. 1. Как видно из рис. 1a, зависимость скорости увеличения магнитного потока R_{av} и $\Phi_{\max}$ хорошо описывается степенным законом, линейная аппроксимация распределения в двойном логарифмическом масштабе приводит к значению $\kappa = 0.48 \pm 0.02$, что хорошо согласуется с теоретическим значением, полученным в [2].

Рис. 1.

Расстояние между центрами противоположных полярностей в АО также связано степенным законом с $\Phi_{\max}$ (рис. 1b), показатель экспоненты в этом случае равен 0.36 ± 0.01 . Это значение больше, чем полученное в анализе [2], однако мы связываем это с разными методиками измерений величины d .

Распределение тилта АО в зависимости от $\Phi_{\max}$ показано на рис. 1c. Как видно, к моменту достижения максимального потока, всплывающие АО уже показывают тилт, который согласуется с законом Джоя: ведущие полярности в АО имеют тенденцию располагаться ближе к экватору, чем хвостовые. Интересно, что распределение на рис 1c сходно с аналогичным распределением в работе Илларионова и др. [9]: авторы показали, что более слабые АО показывают больший разброс тилта по сравнению с сильными группами.

Зависимость между твистом и $\Phi_{\max}$ для всей выборки АО показана на рис. 1d. Как видно, нет прямой связи между этими двумя величинами, т.е. твист АО не коррелирует с максимальным магнитным потоком АО, $\Phi_{\max}$. В то же время, как указано выше, скорость увеличения потока прямо

зависит от $\Phi_{\max}$. Для установления возможной связи между R_{av} и α_{av} одновременно для сильных и слабых АО, мы ввели нормированную скорость всплытия, равную $R_n = R_{av}/\Phi_{\max}^{0.5}$. Распределение R_n versus α_{av} показана на левой панели рис. 2. Визуально невозможно установить прямую связь между параметрами, тем не менее, линейная аппроксимация распределения (черная прямая) показывает, что с увеличением α_{av} увеличивается R_n . Чтобы уменьшить влияние шумов измерений, мы построили аналогичное распределение только для сильных АО с магнитным потоком $\Phi_{\max} > 5 \cdot 10^{21}$ Мкс (правая панель рис. 2). Как видно, в этом случае, практически все точки лежат выше пунктирной кривой.

Рис. 2.

Выводы

Скорость увеличения магнитного потока и максимальный магнитный поток связаны степенным законом с показателем экспоненты $\kappa = 0.48$, что хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями. В то же время, твист активной области устанавливает только нижнюю границу для скорости увеличения потока.

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

Литература

1. Chen F., Rempel M., Fan Y. // *ApJ*, 2017, 846, 149.
2. Otsuji K., Kitai R., Ichimoto K., Shibata K. // *PASJ*, 2011, 63, 1047.
3. Abramenko V.I., Kutsenko A.S., Tikhonova O.I., Yurchyshyn V.B. // *Sol. Phys.*, 2017, 292, 48.
4. Norton A.A., Jones E.H., Linton M.G., Leake, J.E. // *ApJ*, 2017, 842, 3.
5. Magara T. // *ApJ*, 2001, 549, 608.
6. Murray M.J., Hood A. W., Moreno-Insertis F., Galsgaard K., Archontis V. // *A&A*, 2006, 460, 909.
7. Hagino M., Sakurai T. // *PASJ*, 2004, 56, 831.
8. Bobra M.G., Sun X., Hoeksema J.T., et al. // *Sol. Phys.*, 2014, 289, 3549.
9. Illarionov E., Tlatov A., Sokoloff D. // *Sol. Phys.*, 2015, 290, 351.