**СОСТАВЛЯЮЩИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА
ОТ ВСЕХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ДИСКЕ СОЛНЦА:
ВАРИАЦИИ В 24-М ЦИКЛЕ**

Жукова А.В., Абраменко В.И., Куценко А.С.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

**COMPONENTS OF THE MAGNETIC FLUX
FROM ALL ACTIVE REGIONS ON THE DISK OF THE SUN:
VARIATIONS IN THE 24TH CYCLE**

Zhukova A.V., Abramenko V.I., Kutsenko A.S.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

Data set acquired by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO) during 2010–2017 was used to study contributions from different-type active regions (ARs) into the total unsigned magnetic flux during the 24th solar cycle. ARs were distributed into three categories: A-type – regular bipolar ARs; U-type – unipolar spots; B-type – irregular ARs, violating either Hale polarity law or Joy's law or having the leading spot less than the main following spot. A subset of anti-Hale ARs was formed by combining the anti-Hale ARs of B-type and U-type categories. In total, 1494 ARs with the unsigned magnetic flux above 10^{20} Mx were detected. Our analysis showed the following: i) correlation (correlation coefficients are provided in parentheses) between the total unsigned flux and the International Sunspot Number (ISSN) gradually decreases with transition from regular ARs ($r = 0.57$) to irregular ARs ($r = 0.53$) to anti-Hale ARs ($r = 0.31$) to unipolar spots ($r = 0.18$); ii) contributions into the yearly total flux from different AR categories are: 50–70% of flux comes from A-type ARs, 20–40% from B-type ARs and 10–20% from U-type ARs; anti-Hale ARs provided up to 11% of total flux during solar maximum with 7% as cycle average; iii) near the approaching solar minimum, the fraction of flux from anti-Hale groups increased from 5% to 9% and the yearly averaged amount of the anti-Hale flux was constant at about 10^{21} Mx level, which can be considered as the lower boundary of the small-scale fluctuation dynamo productivity on ARs scales. The observed enhancement of the anti-Hale flux during the solar maximum can be due to the combined mechanisms of global mean-field and small-scale fluctuation dynamos.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-173-176

Классическая модель магнитного цикла [1] является основой существующих представлений о происхождении солнечной активности. Генерируемое динамо-процессом магнитное поле состоит из трех частей [2, 3]: зависящего от цикла среднего поля B ; произведенных в результате фрагментации B флуктуаций b (также зависящих от цикла); произведенных безотносительно B и не зависящих от цикла флуктуаций h , обусловленных действием флуктуационного (турбулентного, мелкомасштабного) динамо. Флуктуационное динамо h -типа может работать в широком диапазоне пространственных размеров, в т.ч. на масштабах АО [3].

Исследования изменения свойств АО с циклом показали, что закон полярностей Хейла не выполняется примерно для 4% АО в 21-м [4] и в 23-м [5] циклах, а усредненный магнитный поток (МП) от АО с нарушением законов Хейла и угла наклона Джоя несколько увеличивается в период солнечного минимума [4]. Доля областей анти-Хейл среди количества всех АО возрастает в минимумах 22–23-го циклов [3], что может объясняться независимостью количества таких областей от цикла.

Целью настоящей работы является выявление наличия других (наряду с глобальным динамо) механизмов генерации магнитных полей на Солнце.

Для получения непосредственной оценки продуктивности солнечного динамо был рассчитан МП от АО на основе участков магнитограмм серии sharp_sea_720s инструмента HMI/SDO, полученных со скважностью 9 дней. Были отобраны 1494 АО с потоком не менее 10^{20} Мх, находящиеся не далее 60° от центрального меридиана. Влияние проекции на величину МП было откорректировано путем деления на косинус гелиоцентрического угла μ . Период исследования с 07.06.2010 по 31.12.2017 почти полностью охватывает 24-й цикл, что позволяет говорить об изменении изучаемых величин с циклом. Была получена непрерывная последовательность не перекрывающихся потоковых «портретов» Солнца.

Распределение АО по категориям осуществлялось нами следующим образом [6]: А – правильные биполярные АО, подчиняющиеся законам Хейла и угла наклона Джоя, имеющие лидирующее пятно, большее, чем основное последующее; В – биполярные области с нарушениями хотя бы одной из указанных закономерностей; U – одиночные пятна. Подмножества группы В составили АО с нарушениями: HN – закона Хейла; JN – закона угла наклона Джоя; LN – соотношения между площадями пятен лидирующей и последующей полярностей. АО с несколькими нарушениями входили в каждое из соответствующих подмножеств. Мы предполагали, что для одиночных пятен закон Хейла должен выполняться так же, как для ведущих пятен биполярных областей. Подмножества группы U составили правильные одиночные пятна UY и одиночные пятна UN, для которых закон Хейла нарушен. Особое подмножество анти-Хейл составили АО групп HN и UN.

Анализ показал, что основной вклад в общий поток T вносят АО группы А (рис. 1, левая панель), что согласуется с классической моделью [1]. Однако обособленность кривых А и Т свидетельствует о наличии другого механизма генерации МП помимо глобального динамо. Плавное понижение профилей МП и коэффициентов корреляции от АО группы А к неправильным областям В, к областям анти-Хейл и к одиночным пятнам говорит о том, что резкого разграничения между механизмами не существует: глобальное и флуктуационное мелкомасштабное динамо действуют в общем объеме. В максимуме цикла МП от областей анти-Хейл существенно возрастает (правая панель), вблизи наступающего минимума цик-

ла в 2016–2017 гг. – принимает то же значение 10^{21} Мх для магнитограммы полного диска, что и в предыдущем минимуме 2010 г. Мы можем принять это значение в качестве нижней границы продуктивности флуктуационного динамо на масштабах АО.

Рис. 1. Годовой поток от АО разных групп в зависимости от времени; количество АО приведено в круглых скобках, пирсоновский коэффициент корреляции дневного потока с дневным числом солнечных пятен ISSN – в квадратных скобках.

Вклад от АО разных групп в общий поток (рис. 2) понижается так же плавно от группы А к группе В, к группе U, как и коэффициенты корреляции. В 2015 году, в максимуме цикла, доли потока от правильных областей группы А и от АО группы В почти совпадают, что говорит о сопоставимости влияния глобального и флуктуационного динамо. Рассчитанная доля АО группы HN в общем количестве АО составляет 3.7%, что находится в соответствии с данными [4, 5]. Доля потока от областей анти-Хейл в среднем составляет 7% и достигает 11% в максимуме цикла. В 2016–2017 гг., вблизи наступающего минимума цикла, доля всех областей анти-Хейл в общем в общем потоке увеличивается с 5% до 9%, что согласуется с данными [3]. В минимуме растут также доли биполярных АО (правая панель), у которых нарушения связаны с полярностью и соотношением размеров пятен: HN и LN. Доля потока от неправильных одиночных пятен UN практически постоянна.

Рис. 2. Вклад АО разных групп в общий поток в зависимости от времени.

Максимальные значения потока (1.5×10^{22} Мх), приходящегося на область, (рис. 3), и значительные изменения со временем демонстрируют АО группы В. У правильных АО группы А поток слабее (1.0×10^{22} Мх) и профиль более сглажен. МП всех областей анти-Хейл синхронизирован с потоком группы В и с циклом. Рост потоков от неправильных областей в максимуме цикла говорит об усилении флуктуационного динамо в этот период. В минимуме цикла потоки от всех областей анти-Хейл и от АО с нарушениями полярности (HN) и соотношения размеров пятен (LN) также усиливаются. Отмеченное в [4] увеличение усредненного МП от АО с нарушением законов Хейла и Джоя происходит, по-видимому, за счет группы HN. Самые низкие потоки на область и независимость от цикла демонстрирует группа неправильных одиночных пятен UN.

Рис. 3. Поток, приходящийся на АО данной группы, в зависимости от времени.

Из настоящей работы следует, что на масштабах АО, наряду с глобальным динамо среднего поля, проявляется другой механизм генерации поля. Резкого разграничения между механизмами не наблюдается: глобальное динамо и флуктуационное мелкомасштабное динамо действуют одновременно в общем объеме. В период минимума 11-летнего цикла солнечной активности продуктивность флуктуационного динамо на масштабах АО составляет 10^{21} Мх для мгновенной магнитограммы полного диска. В максимуме цикла глобальное динамо (создающее исходную силовую трубку) и флуктуационное динамо (искажающее и усиливающее ее магнитный поток) действуют совместно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (Проект 18-12-00131).

Литература

1. Babcock, H.W. // ApJ, 1961, 133, 572.
2. Brandenburg A., Sokoloff, D., Subramanian, K. // Space Sci.Rev., 2012, 169, 123.
3. Sokoloff, D., Khlystova, A., Abramenko, V. // MNRAS, 2015, 451, 1522.
4. Wang, Y.M., Sheeley, N.R.Jr. // Sol. Phys., 1989, 124, 81.
5. Stenflo, J.O., Kosovichev, A.G. // ApJ, 2012, 745, 129.
6. Жукова, А.В. // Изв. КрАО, 2018, 114, 74.