ТОКОВЫЕ СИСТЕМЫ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ РАЗНЫХ МАГНИТО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ КЛАССОВ В 24-М ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Фурсяк Ю.А., Абраменко В.И., Жукова А.В.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Республика Крым, Россия

ELECTRIC CURRENT SYSTEMS IN ACTIVE REGIONS OF DIFFER- ENT MAGNETO-MORPHOLOGICAL CLASSES IN THE SOLAR AC- TIVITY CYCLE 24

Fursyak Yu.A., Abramenko V.I., Zhukova A.V.

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

Based on magnetograms of magnetic field vector components in the solar photosphere obtained with the Helioseismic and Magnetic Imager on board Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO), for 66 active regions (ARs) of the 24th solar activity cycle, we calculated parameters of electric currents in the photosphere, and compared the obtained data with the flare index FI and with the magneto-morphological class of an AR [8]. It was shown that:

1) the majority of ARs with low average unsigned electric current density (below 3 mA m^{-2}) belong to the class of regular ARs (type A) and display rather low flare index FI (below 10);

2) the majority of irregular ARs (type B) demonstrate rather high average unsigned electric current density (above 3 mA m^{-2}) and display various flare indices with a predominance of ARs with $FI > 10$.

3) for all ARs with at least one X-class solar flare, the average unsigned electric current density was greater than 3 mA m^{-2} .

In general, we can suggest that irregular ARs are prone to enhanced flare productivity and electric currents as compared to the regular ones.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-313-316

Введение

Уже в первых работах, посвященных исследованию токовых систем в АО, отмечалась их тесная связь со вспышечными процессами [1]. Позже [2] было показано, что крупномасштабный электрический ток величиной около $2 \cdot 10^{12} \text{ A}$, выносит с собой в верхние слои солнечной атмосферы энергию порядка 10^{32} эрг, что сопоставимо с энергией, выделяемой во время мощной солнечной вспышки. Вспышки являются одним из наиболее действенных механизмов, позволяющих за короткое время выделить часть избыточной магнитной энергии. Однако вспышечные процессы уносят лишь несколько процентов энергии непотенциальных магнитных полей [3], переносимой электрическими токами, а большая ее часть реализуется через различные диссипативные процессы в верхних слоях солнечной атмосферы [4].

Наша задача в контексте исследования токовых систем состоит в изучении взаимосвязи параметров вертикального электрического тока с уровнем вспышечной продуктивности и особенностями морфологии магнитных полей АО.

Данные наблюдений

Исследованы 66 АО 24-го цикла солнечной активности, обладающих различной структурой магнитных полей и различным уровнем вспышечной активности.

Вычисление параметров вертикального электрического тока произведено на основе данных о компонентах вектора магнитного поля, получаемых прибором HMI/SDO [5] с применением интегрального метода, описанного в [6]. Данные HMI/SDO доступны по ссылке <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html>. С целью минимизации ошибок в вычислениях, обусловленных эффектом проекции, мониторинг каждой из исследуемых АО проводился только во временной интервал, на протяжении которого область находилась на диске Солнца в пределах $\pm 35^\circ$ по долготе от центрального меридиана.

Для сопоставления параметров электрического тока с уровнем вспышечной активности АО и особенностями ее морфологии, использована разработанная в КрАО магнито-морфологическая классификация активных областей [7, 8]. Согласно данной классификации, все АО разделены на три группы – области типа А, подчиняющиеся законам теории динамо среднего поля – закону полярностей Хейла, закону угла наклона Джоя и правилу о соотношении площадей пятен лидирующей и хвостовой полярностей; области типа В, в которых зафиксировано нарушение хотя бы одного из вышеуказанных законов, и униполярные области (тип U). Каталог магнито-морфологической классификации областей 24-го цикла солнечной активности доступен по адресу <https://sun.crao.ru/databases/catalog-mmcs-ars>.

Результаты и обсуждение

На основе данных о векторе магнитного поля в фотосфере для каждой из исследуемых АО за время ее мониторинга был вычислен ряд параметров вертикального электрического тока. Каждый параметр был усреднен за время наблюдения и сопоставлен со вспышечным индексом (Flare Index, FI [9]) соответствующей области. Наиболее высокая корреляция со вспышечным индексом наблюдалась для двух параметров – усредненного по времени наблюдения суммарного беззнакового тока $\overline{I_{tot}}$, и усредненной за время наблюдения средней беззнаковой плотности вертикального тока $\langle \overline{|J_z|} \rangle$. Корреляционный график для пары FI – $\langle \overline{|J_z|} \rangle$ представлен на Рис. 1. Из графика следует, что существует средняя связь между величиной $\langle \overline{|J_z|} \rangle$ и уровнем вспышечной продуктивности АО ($k = 0.54$). Однако, связь эта далеко не однозначна. Видно, что во многих случаях одному и

тому же значению FI соответствует сразу несколько значений $\langle |j_z| \rangle$. С физической точки зрения этот результат говорит о том, что большая часть энергии, запасенной в электрических токах, реализуется не во вспышках, а посредством иных диссипативных процессов (скажем, через омическую диссипацию электрических токов).

Рис. 1. Зависимость уровня вспышечной активности для исследуемой выборки АО от усредненной за время наблюдения средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока $\langle |j_z| \rangle$. Соответствующими символами на графиках отмечены:верху – области, в которых за время прохождения области по диску Солнца зафиксирована хотя бы одна вспышка рентгеновского класса X (точки), M (звездочки), только вспышки класса C (треугольники); внизу – области из выборки магнито-морфологического класса A (ромбики) и B (звездочки). Квадратиками дополнительно отмечены области-нарушители закона полярностей Хейла. Вертикальные штриховые линии – критические уровни величины $\langle |j_z| \rangle$, полученные на основе более ранних исследований [10] (короткий штрих) и по данным текущих исследований (длинный штрих).

Большой разброс в значениях $\langle |j_z| \rangle$ указывает еще и на то, что разные области могут иметь существенно разный запас магнитной энергии.

Очевидными факторами, влияющими на объем непотенциальной энергии АО, являются размер группы и ее эволюционный статус. Тем не менее, можно выделить еще один фактор, а именно морфологию АО – чем более сложной будет структура магнитного поля области, тем больше будут электрические токи, и тем больше запас свободной магнитной энергии. Разумеется, крайне сложно отобрать достаточное для получения надежной корреляционной зависимости между параметрами тока и морфологическими особенностями АО количество областей, которые при нахождении вблизи центра солнечного диска имели бы почти одинаковый магнитный поток и эволюционный статус, поэтому мы исходили из имеющихся в нашем распоряжении данных.

На нижнем графике рис. 1 представлено разбиение исследуемых АО по магнито-морфологическим классам. Несмотря на сложность картины, можно видеть, что значительное количество АО класса В («области-нарушители») лежит правее линии 3 MA m^{-2} (вертикальная пунктирная линия с длинным штрихом). В то же время, все без исключения АО типа А («правильные области») с $FI < 10$ находятся правее той же линии 3 MA m^{-2} . Таким образом, можно заключить, что области типа А с $\langle |J_z| \rangle < 3 \text{ MA m}^{-2}$ имеют незначительный запас свободной энергии, так что ее быстрое расходование происходит посредством малого числа относительно слабых вспышек.

Граница 3 MA m^{-2} , по-видимому, имеет некое более фундаментальное значение, поскольку, как это следует из верхнего графика на рис. 1, все области исследуемой выборки, в которых наблюдалась хотя бы одна вспышка рентгеновского класса X лежат правее этой границы.

Работа выполнена при поддержке грантом РНФ 18-12-00131.

Литература

1. Зверева А.М., Северный А.Б. // Изв. Крымск. астрофиз. обс. 1970. Т. 41-42. С. 97-157.
2. Абраменко В.И., Гонасюк С.И. // Изв. Крымск. астрофиз. обс. 1987. Т. 76. С. 147-168.
3. Zaitsev V.V., Stepanov A.V. // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 2008. Vol. 51. P. 1123-1160.
4. Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Urpo S., Pohjolainen S. // Astron. Astrophys. 1998. Vol. 337. P. 887-896.
5. Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al. // Sol. Phys. 2012. Vol. 275. P. 207-227.
6. Fursyak Yu.A. // Geomagnetism and Aeronomy. 2018. Vol. 58. P. 1129-1135.
7. Жукова А.В. // Изв. Крымск. астрофиз. обс. 2018. Т. 114. С. 74-86.
8. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // Geomagnetism and Aeronomy. 2018. Vol. 58. P.1159-1169.
9. Abramenko V.I. // Astrophys. J. 2005. Vol. 629. P. 1141-1149.
10. Fursyak Yu.A., Abramenko V.I., Kutsenko A.S. // Astrophysics. 2020. Vol. 63. P. 260-273.