

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 120, № 4, 46–55 (2024)

УДК 523.98

Полный электрический ток в активных областях с разным уровнем вспышечной продуктивности: первые результаты

Ю.А. Фурсяк

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
yuriy_fursyak@mail.ru

Поступила в редакцию 2 октября 2024 г.

Аннотация. Задачей исследования является анализ величины и динамики полного электрического тока, а также его составляющих – вертикального и горизонтального электрических токов – в активных областях (АО) с различным уровнем вспышечной продуктивности. Для расчета величины электрического тока в работе использованы данные инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), установленного на борту Solar Dynamics Observatory (SDO), о пространственном распределении на уровне фотосферы Солнца компонент вектора магнитного поля. Исследованы 12 АО: 3 области с низкой вспышечной продуктивностью, 3 – со средней и 6 – с высокой. Мониторинг каждой области осуществлялся в пределах 30–35 градусов относительно центрального солнечного меридиана, что соответствует временному интервалу в 3–5 суток. Получены следующие предварительные результаты: 1. В большинстве рассмотренных случаев величина средней беззнаковой плотности горизонтального электрического тока в 1.5–4.5 раза больше величины плотности вертикального тока; величина полного электрического тока, таким образом, определяется преимущественно горизонтальным током. 2. В областях NOAA 11283 и 12297 выявлены временные интервалы в несколько десятков часов, в пределах которых величина средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока приблизительно равна или больше средней беззнаковой плотности горизонтального тока. 3. В областях NOAA 11158 и 12673, в которых за время их мониторинга зафиксировано всплытие новых магнитных потоков, наблюдается нарастание величин вертикального, горизонтального и полного электрического тока за 18–20 часов до первых вспышек высоких рентгеновских классов; время нарастания электрического тока существенно меньше временного интервала роста величины суммарного беззнакового магнитного потока. 4. Явная зависимость между величиной полного электрического тока и вспышечной продуктивностью АО, определяемой величиной вспышечного индекса, отсутствует. 5. Наиболее высокие абсолютные значения величины плотности полного электрического тока выявлены в АО со средней вспышечной продуктивностью.

Ключевые слова: Солнце, активность Солнца, активные области, электрические токи

1 Введение

Электрические токи играют важную роль в эволюции активной области (АО). Еще в работе [Alfven, Carlquist \(1967\)](#) было отмечено, что “описание ряда процессов в атмосфере Солнца в терминах электрического тока часто более интересно, чем в терминах магнитного поля”.

Полный электрический ток имеет две составляющие – вертикальную и горизонтальную. Вертикальный электрический ток вычислить более просто: для этого необходимы данные о поперечном магнитном поле на заданном уровне атмосферы Солнца. Существует два подхода к вычислению вертикального тока: дифференциальный, который можно назвать классическим ввиду того, что он использовался уже в первых работах, посвященных исследованию электрических токов в атмосфере Солнца (см. [Severnyy, 1965](#)); и интегральный, который начал применяться только в 80-е годы 20-го века ([Абраменко, Гопасюк, 1987](#)).

Существенно хуже обстоят дела с вычислением горизонтального электрического тока, поскольку здесь требуется информация о вертикальной компоненте магнитного поля на двух уровнях в

атмосфере Солнца. Хотя двухканальные магнитографы и были созданы в свое время (Степанов, Северный, 1962; Северный, 1966; Иошпа, Могилевский, 1965; Кузнецов и др., 1966; Livingston, 1968), но до сегодняшнего дня они не получили широкого распространения. Более того, системные измерения магнитных полей на двух высотах с хорошим временным и пространственным разрешением отсутствуют вовсе. Это делает невозможным вычисление горизонтального электрического тока напрямую, по наблюдениям в двух спектральных линиях, формирующихся на разных высотах, как это делалось в 60–70-х годах 20-го века (см., напр., Котов, 1970; Kotov, 1971). Ввиду этого требуется искать иные, часто косвенные пути вычисления горизонтального тока. Так, Хофманн и Штауде (1987) оценили азимутальную составляющую электрического тока, предполагая определенную геометрию сильно наклоненной магнитной трубки, образующей изолированное солнечное пятно. Певцов и Перегуд (1990) предположили азимутальную (цилиндрическую) симметрию для получения трех компонент электрического тока. В конце 90-х годов 20-го века китайские астрономы предложили достаточно интересный метод для оценки горизонтальных электрических токов. В их подходе используются реальные векторные магнитограммы на одном уровне солнечной атмосферы, которые служат граничными условиями для вычисления компонент вектора магнитного поля на втором уровне (Ji et al., 1998). Метод вычисления горизонтального тока был также предложен Abramenko (2008). В этом случае, рассматривая слой малой толщины, путем несложных математических вычислений и некоторых допущений удается получить оценку горизонтальных токов в фотосфере Солнца. Впоследствии метод был доработан и апробирован (Fursyak, Abramenko, 2017). Именно этот подход применяется в данной работе для вычисления горизонтального электрического тока. Следует заметить, что полученные с применением вышеописанных методик значения плотности горизонтального электрического тока хорошо согласуются между собой не только по порядку величины, но и достаточно близки по абсолютным значениям, а также коррелируют с результатами ранних работ (напр., Котов, 1970).

Целью данной работы является исследование динамики полного электрического тока и его составляющих (вертикального и горизонтального токов), выявление закономерностей и особенностей временных вариаций электрического тока в областях, различающихся уровнем вспышечной продуктивности. Учитывая отсутствие на современном этапе систематических измерений горизонтальных электрических токов, и, следовательно, невозможность изучения его динамики, как и динамики полного электрического тока, решаемые здесь задачи являются новым направлением исследований, а представленные результаты – единственными в своем роде.

2 Используемые данные

Основной объем работы (вычисление параметров магнитного поля и электрических токов) выполнен на основе магнитографических данных инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI, Scherrer et al., 2012), установленного на борту Solar Dynamics Observatory (SDO, Pesnell et al., 2012). Используются магнитограммы Space-Weather HMI Active Region Patches (SHARP, Bobra et al., 2014) компонент вектора магнитного поля на уровне фотосферы Солнца в цилиндрических координатах с временным разрешением 12 мин и пространственным разрешением $0.5''$ пиксел⁻¹ (серия данных hmi.sharp_sea_720s), доступные на сайте Joint Science Operations Center (JSOC)¹. Вместе с магнитографическими данными с сайта JSOC дополнительно загружены маски bitmap (позволяет выделить на прямоугольной SHARP-магнитограмме собственно активную область с уникальным идентификатором National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) и conf_disambig (позволяет выделить пикселы на магнитограмме, в которых с высокой степенью достоверности разрешена π -неопределенность азимута поперечного магнитного поля).

Для построения графиков динамики потока рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å на орбите Земли дополнительно использованы данные космического аппарата GOES-15², а также данные каталога магнито-морфологической классификации (ММК) АО³, разработанной Abramenko et al. (2018) в Крымской астрофизической обсерватории и модифицированной в 2021 г.

¹ <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html>

² <https://www.ncei.noaa.gov/data/goes-space-environment-monitor/access/full/>

³ <https://sun.crao.ru/databases/catalog-mmc-ars>

[Abramenko \(2021\)](#), где, помимо информации о типе АО, содержатся также данные о наиболее мощных вспышках, зафиксированных в области, и о ее вспышечном индексе.

3 Объекты наблюдения

В работе исследованы 12 АО 24-го цикла солнечной активности. Основные параметры исследуемых областей представлены в таблице 1. Во втором столбце таблицы указан номер области согласно

Таблица 1. Основные параметры анализируемых АО

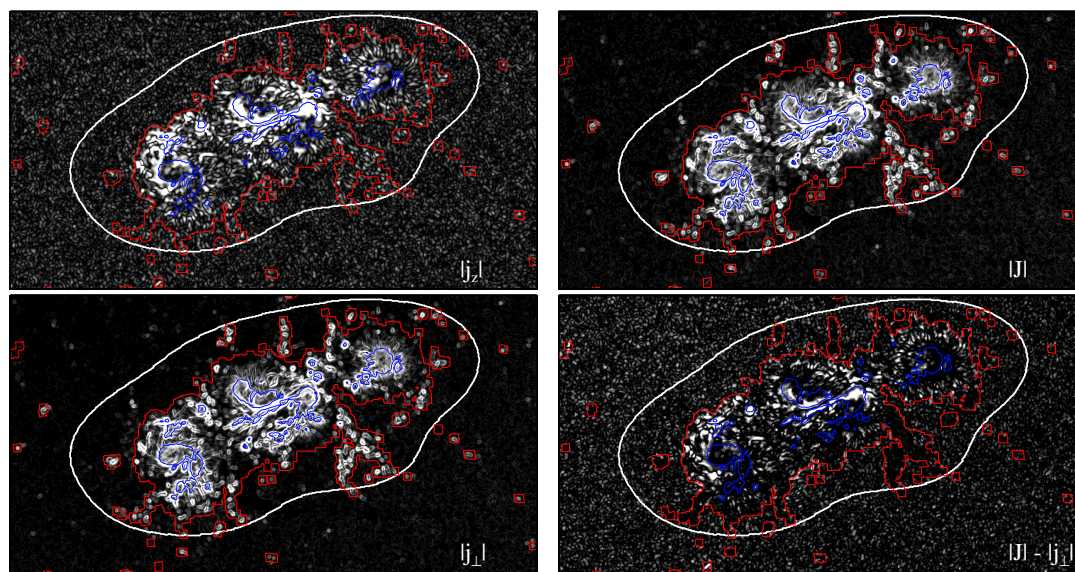
№ п/п	Номер АО (NOAA)	Время мониторинга АО	$\bar{\Phi}$, 10^{22} Мкс	Тип АО (ММК)	Наиболее мощная вспышка	Вспышечный индекс (FI)	$\langle j_z \rangle$, MA M^{-2}	$\langle j_{\perp} \rangle$, MA M^{-2}	$\langle J \rangle$, MA M^{-2}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	11158	12-15.02.2011	0.76	B2	X2.2 15.02.2011	59.26	4.10	7.07	8.18
2	11283	04-07.09.2011	0.39	B2	X2.1 06.09.2011	45.61	3.12	3.99	5.10
3	11302	27-30.09.2011	1.49	A2	X1.9 24.09.2011	78.79	3.53	6.57	7.47
4	11711	04-07.04.2013	0.29	A1	C1.7 03.04.2013	0.17	2.35	5.50	5.99
5	11890	07-10.11.2013	1.48	A2	X3.3 05.11.2013	55.63	3.23	9.88	10.40
6	12297	11-14.03.2015	0.83	B3	X2.2 11.03.2015	46.32	4.62	4.40	6.43
7	12305	25-29.03.2015	1.08	B1	C8.7 25.03.2015	1.33	2.69	4.84	5.57
8	12339	10-13.05.2015	2.17	B2	M1.9 06.05.2015	8.80	2.83	6.86	7.43
9	12443	02-05.11.2015	1.87	B2	M3.7 04.11.2015	11.84	2.78	12.40	12.71
10	12473	25-30.12.2015	1.20	B2	M4.7 23.12.2015	9.02	2.89	9.19	9.65
11	12673	02-05.09.2017	0.92	B3	X9.3 06.09.2017	223.83	3.99	8.75	9.63
12	12674	03-06.09.2017	1.40	A1	C5.2 30.08.2017	0.76	2.49	4.76	5.38

классификации NOAA, в третьем – время мониторинга АО (соответствует временному интервалу, на протяжении которого область находилась в пределах $\pm 35^\circ$ относительно центрального солнечного меридиана). В четвертом столбце указано усредненное за время мониторинга АО значение суммарного беззнакового магнитного потока (усреднение по времени обозначается чертой сверху). Суммарный беззнаковый магнитный поток АО рассчитывался согласно формуле $\bar{\Phi} = s_{\text{pix}} \times \sum |B_z|_{\text{bitmap}+575}$, где s_{pix} – площадь пиксела на магнитограмме HMI/SDO, $\sum |B_z|_{\text{bitmap}+575}$ – сумма абсолютных значений напряженностей магнитных полей по уровню > 575 Гс (см. [Norton et al., 2017](#)) внутри маски bitmap. В пятом столбце таблицы указан тип области по ММК. Согласно ММК, области делятся на три основных типа: U – униполярные; A – области, подчиняющиеся основным эмпирическим закономерностям, установленным для групп солнечных пятен; B – области-нарушители основных эмпирических закономерностей, установленных для групп солнечных пятен. В анализируемой выборке областей типа U – 0, типа A – 4, типа B – 8. Шестой столбец таблицы содержит информацию о рентгеновском классе наиболее мощной вспышки, зафиксированной в исследуемой АО, и о дате, в которую она зафиксирована. Именно по максимальному рентгеновскому классу вспышек, зафиксированных в АО во время ее нахождения на видимом диске Солнца, здесь определяется ее вспышечная продуктивность. Под низкой вспышечной продуктивностью подразумевается фиксация вспышек только рентгеновского класса C, под средней – фиксация вспышек рентгеновских классов C и M, под высокой продуктивностью – регистрация в АО, помимо прочих, как минимум одной вспышки рентгеновского класса X. В седьмом столбце указано значение вспышечного индекса (FI) АО ([Abramenko, 2005](#)): $FI = \frac{1}{\tau} \times (\sum C + 10 \sum M + 100 \sum X)$, где τ – время (в сутках) нахождения АО на видимом диске Солнца; $\sum C$, $\sum M$, $\sum X$ – суммарный балл вспышек рентгеновских классов C, M и X соответственно, зафиксированных в АО. Вспышечный индекс АО будет равен 1.0 (100.0), если в области ежедневно фиксируется одна вспышка рентгеновского класса C1.0 (X1.0). В анализируемой выборке представлены три АО с низкой вспышечной продуктивностью (NOAA 11711, 12305 и 12674), три области со средней вспышечной продуктивностью (NOAA 12339, 12443, и 12473) и 6 АО с высокой вспышечной продуктивностью, три из которых (NOAA 11158, 11283 и 12673) во временной интервал их мониторинга имели особенности эволюции (всплытие нового магнитного потока или интенсивные движения отдельных пятен в группе). Как видим из данных таблицы 1, вспышечный индекс областей с низкой вспышечной продуктивностью не превышает нескольких единиц, областей

со средней продуктивностью достигает значений порядка десяти единиц, АО с высокой всплечной продуктивностью равен нескольким десяткам единиц, а в отдельных случаях (NOAA 12673) – нескольким сотням. Столбцы 8–10 таблицы содержат информацию о средних беззнаковых значениях плотности соответственно вертикального, горизонтального и полного электрического тока в АО, усредненных за время мониторинга области (4–5 суток со скважностью 12 минут, т. е. усреднение по времени осуществляется по 400–600 точкам). Более детально о данных параметрах сказано в разделах 4 и 5.

4 Методы вычисления анализируемых параметров

Как уже отмечалось во Введении, для вычисления полного электрического тока необходимо знать значения его составляющих – вертикального и горизонтального тока.



AR NOAA 11158 00:00UT 15.02.2014

Рис. 1. Карты распределения модуля плотности вертикального (слева сверху), горизонтального (слева внизу) и полного (справа сверху) электрического тока в области NOAA 11158 на момент времени 00:00 UT 15 февраля 2011 года (приблизительно за два часа до вспышки рентгеновского класса X2.2). Справа внизу показана карта разности между значениями плотности горизонтального и полного тока. Карты масштабированы следующим образом: слева сверху – от 0 (черное) до 0.01 A м^{-2} (белое), слева внизу и справа сверху – от 0 (черное) до 0.04 A м^{-2} (белое), справа внизу – от 0 (черное) до 0.005 A м^{-2} (белое). Белым контуром обозначена маска bitmap, красным – маска conf_disambig. Синими контурами отмечены пятна в АО с абсолютным значением напряженности магнитного поля более 1000 Гс. Масштаб изображений $270 \times 137 \text{ Mm}$

Для вычисления вертикального электрического тока существует два метода: дифференциальный и интегральный. Здесь применяется интегральный метод. Детально он описан в работе [Fursyak \(2018\)](#). В основе используемого подхода лежит интегральная форма закона Ампера:

$$(I_z)_{i,j} = \frac{1}{\mu_0} \int_L \mathbf{B}_t dr, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн м}^{-1}$ – магнитная постоянная; $\mathbf{B}_t \equiv (B_x, B_y)$ – вектор поперечного магнитного поля АО; dr – элемент интегрирования, равный по величине размеру пиксела на магнитограмме HMI/SDO (363 км); i, j – координаты пиксела на магнитограмме, в котором вычисляется значение вертикального электрического тока. Интеграл в правой части выражения 1 вычисляется приближенно с использованием метода Симпсона. Контур интегрирования L имеет прямоугольную форму и размеры 5×5 пикселов. Усреднение тока по площади контура L дает значение плотности вертикального тока в центральном его пикселе $(j_z)_{i,j}$.

Вычисление горизонтального электрического тока производится с применением метода, описанного в работе [Fursyak, Abramenko \(2017\)](#). Исходной формулой является закон Ампера в дифференциальной форме:

$$\mu_0 \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

а конечная формула для оценки квадрата плотности горизонтального тока имеет вид

$$j_{\perp}^2 = \frac{1}{\mu_0^2} \left[\left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

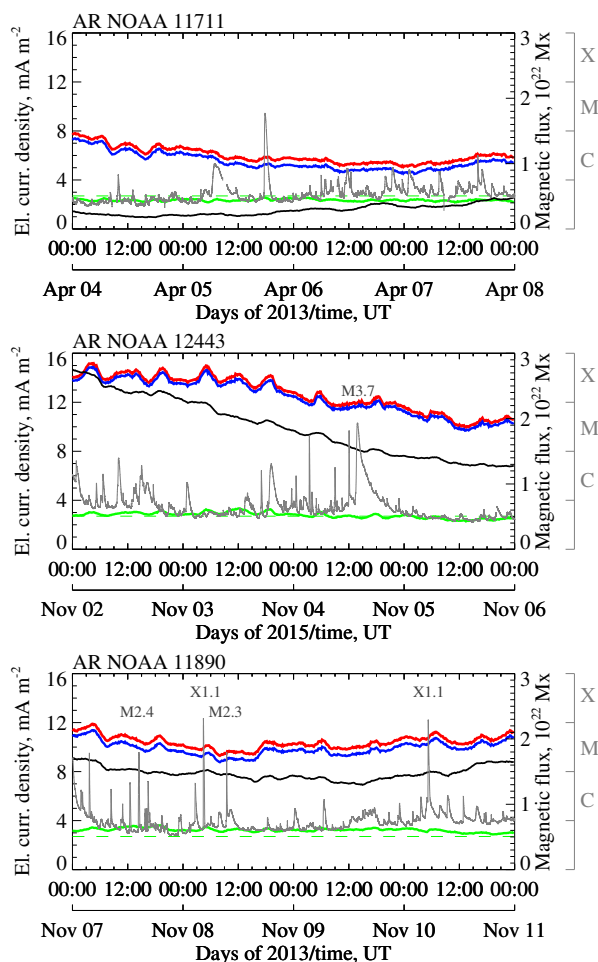


Рис. 2. Динамика средней беззнаковой плотности вертикального (зеленая кривая), горизонтального (синяя кривая) и полного (красная кривая) электрического тока в областях с низкой (вверху), средней (в центре) и высокой (внизу) вспышечной продуктивностью. Черной кривой показана динамика суммарного беззнакового магнитного потока АО, серой кривой – поток рентгеновского излучения Солнца в диапазоне длин волн 1–8 Å на орбите Земли (по данным GOES-15). Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек, зафиксированных в исследуемых АО. Представлены типичные случаи

но прийти к выводу, что вертикальный электрический ток связан со вспышками в АО, в то время как горизонтальный ток задействован в иных процессах.

Как видно, выражение 3 дает возможность определить лишь абсолютное значение вектора плотности горизонтального электрического тока, но не его направление. Таким образом, направление вектора полного тока также определить невозможно. Однако имеется возможность вычислить плотность полного электрического тока, зная значения плотности вертикального и горизонтального тока в каждом пикселе исходной магнитограммы:

$$J = \sqrt{(j_z)^2 + (j_{\perp})^2}. \quad (4)$$

Примеры карт распределения абсолютных значений плотности горизонтального, вертикального и полного электрического тока, а также карта разности плотности полного и горизонтального токов представлены на рис. 1.

5 Результаты

На основе полученных карт распределения плотностей вертикального, горизонтального и полного электрического тока, для всех областей анализируемой выборки вычислены значения средней беззнаковой плотности соответственно вертикального $\langle |j_z| \rangle$, горизонтального $\langle |j_{\perp}| \rangle$ и полного $\langle |J| \rangle$ тока, построены графики временных вариаций параметров электрического тока для каждой АО за временной интервал их мониторинга. Примеры графиков приведены на рис. 2 (показаны типичные случаи).

Как видно из представленных графиков, средняя беззнаковая плотность вертикального электрического тока $\langle |j_z| \rangle$ значительно различается для областей с разным уровнем вспышечной продуктивности: более высокие значения данного параметра характерны для АО с более высокой вспышечной продуктивностью. В то же время аналогичное поведение средней беззнаковой плотности горизонтального и полного тока не наблюдается. Таким образом, мож-

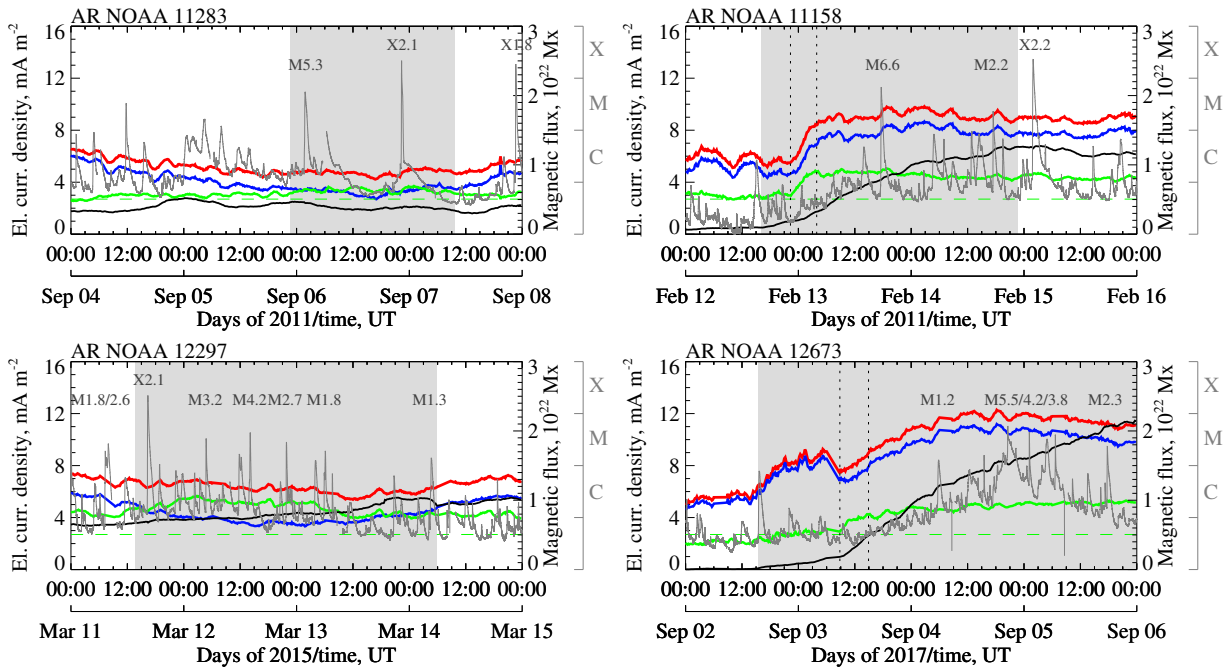


Рис. 3. Динамика параметров электрического тока в областях NOAA 11283 (вверху) и 12297 (внизу). Обозначения те же, что и на рис. 2. Серая закрашенная область отмечает временной интервал, на протяжении которого величина средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока приблизительно равна или больше величины средней беззнаковой плотности горизонтального тока

Рис. 4. Динамика параметров электрического тока в областях NOAA 11158 (вверху) и 12673 (внизу) с дополнительным всплытием магнитного потока. Обозначения те же, что и на рис. 2. Серая закрашенная область отмечает временной интервал нарастания суммарного беззнакового магнитного потока, вертикальные пунктиры – временной интервал быстрого нарастания величины средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока выше критического значения (2.7 mA m^{-2})

Также из графиков рис. 2 видно, что плотность горизонтального тока в 1.5–4.5 раза больше соответствующих значений плотности вертикального тока. Таким образом, основной вклад в абсолютные значения величины полного электрического тока дает именно горизонтальный ток. Однако в анализируемой выборке АО в двух случаях (см. рис. 3) – для областей NOAA 11283 и 12297 – найдены временные интервалы, в пределах которых величина средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока приблизительно равна или даже больше средней беззнаковой плотности горизонтального тока. Для АО NOAA 11283 этот временной интервал равен приблизительно 35 часам, а для NOAA 12297 – 64 часа. Пока объем данных слишком мал для того, чтобы сделать какие-либо выводы, однако, если аналогичная картина будет наблюдаться на большем материале, возникнет необходимость дополнительно исследовать подобные АО.

Интересна динамика параметров электрического тока в областях NOAA 11158 и 12673, в которых за время мониторинга наблюдалось дополнительное всплытие магнитного потока (см. рис. 4). В первую очередь необходимо отметить достаточно сильные колебания величин плотности горизонтального и полного электрического тока еще до начала всплытия магнитного потока. В области NOAA 11158 эти колебания фиксируются уже за 16 часов до всплытия магнитного потока, в области NOAA 12673 – приблизительно за два часа. При этом какие-либо значимые изменения в величине средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока в эти временные интервалы не наблюдаются. Существенное и достаточно быстрое нарастание величины $\langle |j_z| \rangle$ выше критического значения в 2.7 mA m^{-2} (см. Fursyak et al., 2020) начинается в области NOAA 11158 приблизительно через 6 часов после начала всплытия магнитного потока, в области NOAA 12673 – через 17 часов и длится в обоих случаях порядка 6 часов (этот временной интервал отмечен вертикальными пунктирами на графиках рис. 4), что может указывать на достаточно быстрое перераспределение

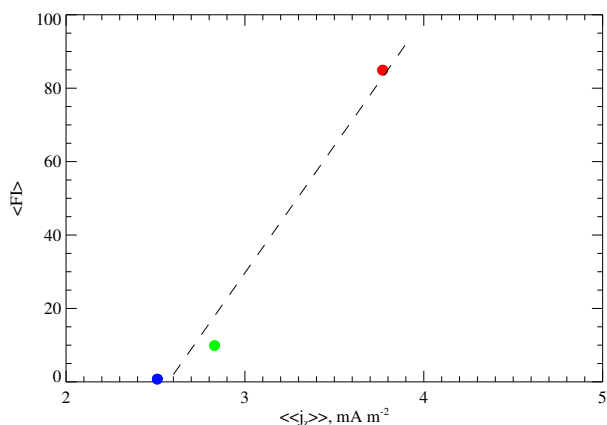


Рис. 5. Зависимость между усредненной величиной средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока $\langle\langle \overline{|j_z|} \rangle\rangle$ и усредненным вспышечным индексом ($\langle FI \rangle$) для областей с низкой (синяя точка), средней (зеленая точка) и высокой (красная точка) вспышечной продуктивностью

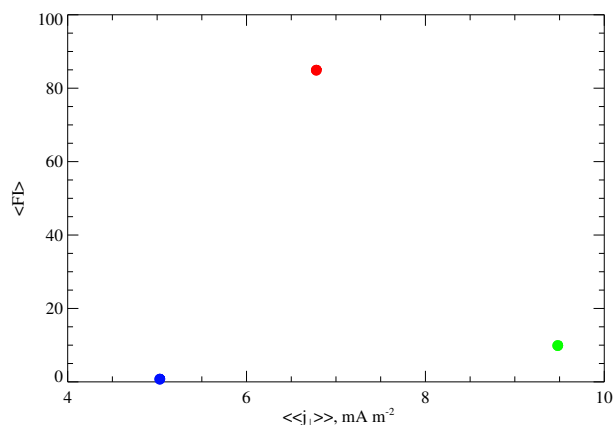


Рис. 6. Зависимость между усредненной величиной средней беззнаковой плотности горизонтального электрического тока $\langle\langle \overline{|j_{\perp}|} \rangle\rangle$ и усредненным вспышечным индексом ($\langle FI \rangle$). Обозначения те же, что и на рис. 5

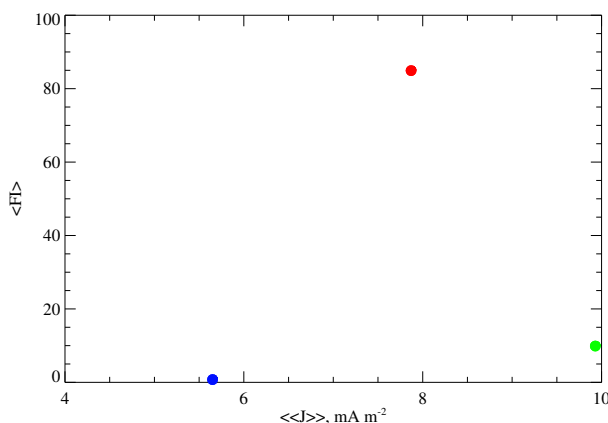


Рис. 7. Зависимость между усредненной величиной средней беззнаковой плотности полного электрического тока $\langle\langle \overline{|J|} \rangle\rangle$ и усредненным вспышечным индексом ($\langle FI \rangle$). Обозначения те же, что и на рис. 5

магнитной энергии АО. Почти одновременно (запаздывание не более часа) начинается и нарастание величин $\langle |j_{\perp}| \rangle$ и $\langle |J| \rangle$, однако здесь время нарастания параметров больше (порядка 10 часов для области NOAA 11158 и более суток для области NOAA 12673). Эти результаты дополнительно подтверждают высказанное выше предположение о том, что составляющие полного электрического тока – горизонтальный и вертикальный токи – связаны с разными процессами в атмосфере Солнца. Следует также отметить, что нарастание средних беззнаковых плотностей вертикального, горизонтального и полного электрического тока фиксируется приблизительно за 18–20 часов до первых вспышек высоких рентгеновских классов, а также то, что рост суммарного беззнакового магнитного потока АО наблюдается на существенно большей временной шкале, чем рост параметров электрического тока.

Усреднение анализируемых параметров электрического тока по областям с низкой (NOAA 11711, 12305, 12674), средней (NOAA 12339, 12443, 12473) и высокой (NOAA 11158, 11283, 11302, 11890, 12297, 12673) вспышечной продуктивностью показало следующее (см. таблицу 2 и рис. 5–7):

- Зависимость между усредненной величиной средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока $\langle\langle \overline{|j_z|} \rangle\rangle$ и усредненным вспышечным индексом ($\langle FI \rangle$), представленная на

рис. 5, квазилинейна: чем больше вертикальный электрический ток, тем выше вспышечная продуктивность АО.

- Зависимость между усредненной величиной средней беззнаковой плотности горизонтального электрического тока $\langle\langle \overline{|j_{\perp}|} \rangle\rangle$ и усредненным вспышечным индексом ($\langle FI \rangle$) существенно более сложная (см. рис. 6). Видно, что для АО анализируемой выборки со средней вспышечной продуктивностью значение параметра $\langle\langle \overline{|j_{\perp}|} \rangle\rangle$ почти в 1.5 раза больше, чем для областей с высокой вспышечной продуктивностью. Однако здесь может присутствовать эффект селекции: сама по себе анализируемая выборка небольшая. Возможно, наблюдаемый эффект можно объяснить сложностью магнитной конфигурации АО: как следует из данных таблицы 1, выбранные для анализа области со средней активностью относятся к типу В2 согласно ММК, т. е. являются нарушителями основных эмпирических закономерностей, установленных для групп солнечных пятен.
- Зависимость между усредненной величиной средней беззнаковой плотности полного электрического тока $\langle\langle \overline{|J|} \rangle\rangle$ и усредненным вспышечным индексом ($\langle FI \rangle$) подобна зависимости для пары $\langle\langle \overline{|j_{\perp}|} \rangle\rangle - \langle FI \rangle$ (рис. 7). Это объясняется тем, что, как уже было сказано выше, величина средней беззнаковой плотности горизонтального электрического тока в большинстве случаев превышает величину средней беззнаковой плотности вертикального тока, следовательно, именно этот параметр вносит основной вклад в величину плотности полного электрического тока.

Таблица 2. Усредненные величины вспышечного индекса (FI) и параметров электрического тока для областей с разным уровнем вспышечной продуктивности

	$\langle FI \rangle$	$\langle\langle \overline{ j_z } \rangle\rangle$, мА м ⁻²	$\langle\langle \overline{ j_{\perp} } \rangle\rangle$, мА м ⁻²	$\langle\langle \overline{ J } \rangle\rangle$, мА м ⁻²	
	1	2	3	4	5
Области с низкой вспышечной продуктивностью	0.75	2.51	5.03	5.65	
Области со средней вспышечной продуктивностью	9.89	2.83	9.48	9.93	
Области с высокой вспышечной продуктивностью	84.91	3.77	6.78	7.87	

6 Заключение

Изучение динамики вертикального, горизонтального и полного электрического тока небольшой выборки из 12 АО 24-го цикла солнечной активности позволяет выделить некоторые особенности, которые требуют для подтверждения дополнительного статистического исследования:

1. В большинстве рассмотренных случаев величина средней беззнаковой плотности горизонтального электрического тока в 1.5–4.5 раза больше величины плотности вертикального тока. Таким образом, величина полного электрического тока определяется преимущественно горизонтальным током.
2. В двух случаях (области NOAA 11283 и 12297) выявлены временные интервалы, в пределах которых величина средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока приблизительно равна или больше средней беззнаковой плотности горизонтального тока. Для АО NOAA 11283 этот временной интервал равен 35 часам, а для NOAA 12297 – 64 часам.
3. В областях NOAA 11158 и 12673 анализируемой выборки, в которых за время их мониторинга зафиксировано всплытие новых магнитных потоков, наблюдается нарастание величин вертикального, горизонтального и полного электрического тока за 18–20 часов до первых вспышек высоких рентгеновских классов; время нарастания электрического тока существенно меньше временного интервала роста величины суммарного беззнакового магнитного потока.
4. Явная зависимость между величиной полного электрического тока и вспышечной продуктивностью АО, определяемой величиной вспышечного индекса, отсутствует.

5. Наиболее высокие абсолютные значения величины плотности полного электрического тока зафиксированы в областях со средней вспышечной продуктивностью.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, ГЗ № 122022400224-7. Автор благодарит рецензента за интерес к статье и полезные замечания, которые в значительной мере помогли улучшить работу.

Литература

- Абраменко В.И., Гопасюк С.И., 1987. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 76. С. 147. [Abramenko V.I., Gorasyuk S.I., 1987. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 76. pp. 147–168. (In Russ.)]
- Иошпа Б.А., Могилевский Э.И., 1965. Солн. активность. № 2. С. 118. [Ioshpa B.A., Mogilevskii E.I., 1965. *Soln. aktivnost'*, no. 2, pp. 118–130. (In Russ.)]
- Котов В.А., 1970. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 41–42. С. 67. [Kotov V.A., 1970. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 41–42, pp. 67–88. (In Russ.)]
- Кузнецов Д.А., Куклин Г.В., Степанов В.Е., 1966. Результаты наблюдений и исследований в период МГСС. Вып. 1. С. 80. [Kuznetsov D.A., Kuklin G.V., Stepanov V.E., 1966. *Rezul'taty nablyudenii i issledovaniy v period MGSS*, iss. 1, pp. 80–87. (In Russ.)]
- Северный А.Б., 1966. Астрон. журн. Т. 43. С. 465. [Severny A.B., 1966. *Astron. zhurn.*, vol. 43, pp. 465–479. (In Russ.)]
- Степанов В.Е., Северный А.Б., 1962. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 28. С. 166. [Stepanov V.E., Severny A.B., 1962. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 28, pp. 166–193. (In Russ.)]
- Abramenko V.I., 2005. *Astrophys. J.*, vol. 629, iss. 2, pp. 1141–1149.
- Abramenko V.I., 2008. [arXiv:0806.1547](https://arxiv.org/abs/0806.1547)
- Abramenko V.I., 2021. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 507, iss. 3, pp. 3698–3706.
- Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S., 2018. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 58, iss. 8, pp. 1159–1169.
- Alfven H., Carlquist P., 1967. *Solar Phys.*, vol. 1, iss. 2, pp. 220–228.
- Bobra M.G., Sun X., Hoeksema J.T., et al., 2014. *Solar Phys.*, vol. 289, iss. 9, pp. 3549–3578.
- Fursyak Yu.A., 2018. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 58, iss. 8, pp. 1129–1135.
- Fursyak Yu.A., Abramenko V.I., 2017. *Astrophysics*, vol. 60, iss. 4, pp. 544–552.
- Fursyak Yu.A., Abramenko V.I., Kutsenko A.S., 2020. *Astrophysics*, vol. 63, iss. 2, pp. 260–273.
- Hofmann A., Staude J., 1987. *Publications of the Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences*, vol. 66, pp. 105–107.
- Ji H.S., Song M.T., Li X.Q., Hu F.M., 1998. *Solar Phys.*, vol. 182, iss. 2, pp. 365–379.
- Kotov V.A., 1971. In: Howard R. (Ed.), *Solar Magnetic Fields*, Proc. 43rd IAU Symp., Reidel, Dordrecht, pp. 212–219.
- Livingston W.C., 1968. *Astrophys. J.*, vol. 153, pp. 929–942.
- Norton A.A., Jones E.H., Linton M.G., Leake J.E., 2017. *Astrophys. J.*, vol. 842, iss. 1, article id. 3.
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, iss. 1–2, pp. 3–15.
- Pevtsov A.A., Peregud N.L., 1990. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, vol. 58, pp. 161–165.
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, iss. 1–2, pp. 207–227.
- Severnyi A.B., 1965. *Sov. Astron.*, vol. 9, pp. 171–182.

Total electric current in active regions with different levels of flare productivity: first results

Yu.A. Fursyak

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
yuriy_fursyak@mail.ru

Abstract. The aim of the study is to analyze the magnitude and dynamics of the total electric current, as well as its components – the vertical and horizontal electric currents – in active regions (ARs) with different levels of flare productivity. To calculate the magnitude of the electric current, we used data from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument on board the Solar Dynamics Observatory (SDO) on the spatial distribution of the magnetic field vector components at the level of the solar photosphere. Twelve ARs were studied: three ARs with low flare productivity, three ARs with moderate, and six ARs with high. Each AR was monitored within 30–35 degrees relative to the central solar meridian, which corresponds to a time interval of 3–5 days. The preliminary results are as follows: (1) In most of the considered cases, the average unsigned density of the horizontal electric current is 1.5–4.5 times greater than the density of the vertical electric current; the magnitude of the total electric current is thus determined mainly by the horizontal electric current. (2) In the NOAA AR 11283 and 12297, time intervals of several tens of hours were revealed, within which the average unsigned density of the vertical electric current is approximately equal to or greater than the average unsigned density of the horizontal electric current. (3) In the NOAA AR 11158 and 12673 of the analyzed sample, in which the emergence of new magnetic fluxes was recorded during their monitoring time, an increase in the magnitudes of the vertical, horizontal, and total electric currents is observed 18–20 hours before the first solar flares of high X-ray classes; the time of increase in the electric current is significantly less than the time interval of increase in the magnitude of the total unsigned magnetic flux. (4) There is no explicit relationship between the magnitude of the total electric current and the flare productivity of an AR determined by the flare index. (5) The highest absolute values of the total electric current density are characteristic for ARs with moderate flare productivity.

Key words: Sun, solar activity, active regions, electric currents