

DOI: 10.54503/0571-7132-2023.66.2-265

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В ПРОЦЕССАХ НАГРЕВА КОРОНЫ НАД АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ НА СОЛНЦЕ

Ю.А.ФУРСЯК

Поступила 1 февраля 2023

Принята к печати 22 мая 2023

В работе ставится задача изучить роль крупномасштабных электрических токов, распространяющихся в верхние слои солнечной атмосферы, в процессах нагрева короны Солнца. Для обнаружения и вычисления величины крупномасштабного электрического тока были использованы данные о распределении компонентов вектора магнитного поля в фотосфере, предоставляемые инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO). Для оценки температуры в короне над активными областями (АО) использованы фотогелиограммы короны Солнца в каналах ультрафиолетового излучения 131, 171, 193 и 211 Å, предоставляемые инструментом Atmospheric Imaging Assembly (AIA/SDO). Изучена динамика крупномасштабного тока и средней температуры в 9-ти областях с разным уровнем вспышечной активности, построены карты пространственного распределения температуры в короне над АО. Получены следующие результаты: 1. Нагрев коронального вещества за счет омической диссипации крупномасштабных электрических токов идет в стационарном режиме. 2. Повышение средней температуры в короне над АО во время солнечных вспышек до значений $\langle \log T \rangle = 6.3 - 6.5$ (2.0-3.2 МК) обусловлено не только нагревом корональных структур крупномасштабными электрическими токами, но и иными процессами на корональных высотах. 3. Для областей NOAA 11899 и 12494 обнаружено снижение значений средней температуры в короне до $\langle \log T \rangle = 5.7$ (0.5-0.6 МК) при одновременном падении значений величины крупномасштабного электрического тока до нуля. Данные наблюдения указывают на выключение механизма нагрева короны за счет омической диссипации электрических токов при нулевых (в пределах ошибок вычислений) значениях крупномасштабного электрического тока. 4. В областях NOAA 12192 и 12371 при построении карт распределения температуры в короне вне вспышечных событий обнаружены горячие структуры с температурой ≥ 10 МК, которые, по-видимому, обозначают местоположение канала крупномасштабного электрического тока на корональных высотах. Для области NOAA 12192 это предположение подтверждается результатами выполненного в 2016г. численного моделирования.

Ключевые слова: *Солнце: активные области: магнитное поле: электрические токи: ультрафиолетовое излучение: нагрев короны*

1. **Введение.** Проблема нагрева солнечной короны до температур свыше 1 МК, при том, что нижележащие слои солнечной атмосферы имеют существенно более низкую температуру, остается одной из нерешенных в полной мере задач современной физики Солнца.

Следует заметить, что еще во второй половине XIX-го - начале XX-го веков изучение внешних слоев солнечной атмосферы было сопряжено с

огромными трудностями, поскольку иногда исследователям приходилось преодолевать расстояния тысячи километров, чтобы попасть на полосу полного солнечного затмения и буквально за несколько минут попытаться сделать снимки хромосферы Солнца и расположенной выше короны. Весьма показательным является тот факт, что "с момента открытия короны в 1851г. и до 1930г. ее наблюдали в общей сложности в течение часа" [1, с.215].

В 1930г. французский оптик Бернар Лио создал первый в мире внезатменный коронограф, ознаменовав новый этап в изучении внешних слоев солнечной атмосферы - при благоприятных погодных условиях можно было получать ежедневные изображения короны с одной точки местности.

С 1945г. начинаются наблюдения солнечной короны в радиодиапазоне, а с запуском первого искусственного спутника Земли в 1957г. и началом космической эры за пределы земной атмосферы было отправлено множество космических исследовательских аппаратов, часть которых была предназначена для изучения Солнца и, в частности, солнечной короны, в широком диапазоне длин электромагнитных волн - от радиодиапазона до рентгеновского и гамма-излучения. Однако, несмотря на десятилетия исследований, большое количество теоретических работ и массы поступающей информации (к примеру, ежедневный объем данных только инструмента Atmospheric Imaging Assembly (AIA) [2], установленного на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO) [3], составляет около 2 Тбайт), проблема нагрева короны Солнца все еще остается далекой от окончательного решения.

Различными исследователями и исследовательскими группами выделяются достаточно много механизмов нагрева коронального вещества, которые можно разделить на две группы - внешние (в этом случае так называемая "свободная" магнитная энергия привносится извне) и внутренние (нагрев плазмы осуществляется за счет конвертации свободной энергии магнитной петли). К внешним механизмам нагрева относятся: испарение хромосферной плазмы в корону [4,5], диссипация альфвеновских волн [6,7], циклотронное поглощение генерируемых во время вспышки электромагнитных волн [8] и др. Среди внутренних механизмов нагрева короны выделяют микровспышки (нано-вспышки), обусловленные пересоединениями внутри магнитной петли [9], тиринг (разрывную) неустойчивость [10], омическую диссипацию электрических токов [11] и др.

Если говорить об электрических токах на корональных высотах и их роли в нагреве коронального вещества, то здесь существует множество проблем. Во-первых, на сегодняшний день отсутствуют регулярные наблюдения с целью вычисления вектора магнитного поля в короне, и, как следствие, прямое вычисление электрических токов, по сути, невозможно. В условиях отсутствия регулярных наблюдений, информацию о векторе магнитного поля

и векторе электрического тока на корональных высотах получают на основе модельных расчетов [12-18]. Интересная методика оценки электрических токов в короне была предложена в работе [19]. Суть метода сводилась к измерению степени вращения плоскости поляризации линейно поляризованного излучения от далекого космического объекта (в рассматриваемой работе это радиоисточник 3C 228) при его прохождении сквозь внешние слои короны Солнца, в которых присутствуют магнитные поля (эффект Фарадея). Поскольку степень вращения плоскости поляризации посредством неких соотношений связана с магнитными полями в короне, а магнитные поля, в свою очередь, связаны с электрическими токами (закон Ампера), то данные связи позволяют после ряда преобразований получить формулу для вычисления электрического тока.

Еще один метод был разработан астрономами Крымской астрофизической обсерватории конца 80-х - начала 90-х гг. XX-го века [20,21], возрожден и доработан в недавней работе [22]. На основе надежных наблюдательных данных о распределении компонентов вектора магнитного поля на уровне фотосферы были обнаружены крупномасштабные электрические токи, которые, исходя из ряда косвенных признаков, поднимаются высоко в хромосферу и корону, и, следовательно, должны принимать участие в различных процессах в верхних слоях солнечной атмосферы. Была показана связь крупномасштабных электрических токов со вспышками. Вероятно, эти токи, величиной порядка 10^{13} А, играют роль и в процессах нагрева коронального вещества над активной областью (АО) (здесь под активной областью подразумевается группа солнечных пятен и атмосфера Солнца над ней).

Проведенный с помощью инструментов космического аппарата SOHO в конце XX-го века стереоскопический анализ корональных магнитных петель позволил обнаружить лишь незначительные изменения температуры корональных петель с высотой [23,24]. Аналогичные результаты были получены и на основе анализа данных наблюдений космического аппарата TRACE [25]. Малый градиент температуры на корональном участке магнитной петли означает, что источник нагрева должен находиться в тепловом балансе с радиационными потерями, поскольку при иных условиях невозможно обеспечить наблюдаемую квазистационарность магнитной петли на протяжении значительного временного интервала. В работе [26] высказано предположение, что вероятным механизмом нагрева корональных петель в подобных случаях является омическая диссипация электрических токов. В условиях спокойной короны нагрев плазмы и ускорение частиц в магнитной петле связаны со столкновениями ионов с нейтральными атомами (так называемая проводимость Каулинга [27]). Теоретические расчеты показывают, что наличие в короне даже небольшого количества (порядка 10^{-5} от общей массы) нейтральных атомов гелия обеспечивает рост сопротив-

ления магнитной петли до аномальных значений [28,29], необходимых для эффективного нагрева коронального вещества электрическими токами. Однако корональные структуры над АО часто имеют более высокую температуру, в диапазоне от нескольких единиц до десятков МК. В подобных условиях существование нейтральных атомов становится невозможным, а причиной резкого увеличения сопротивления плазмы становится возбуждение плазменных неустойчивостей.

Еще одним важным вопросом, связанным с нагревом короны посредством омической диссипации электрических токов, является характерный масштаб области энерговыделения. При характерных размерах солнечных пятен (силовых магнитных трубок, $\sim 10^9$ см), время диссипации электрического тока, даже при условии аномальных значений проводимости плазмы, оказывается слишком большим, чтобы обеспечить эффективный нагрев коронального вещества. Нагрев короны электрическими токами в квазистационарном режиме становится возможным лишь на масштабах в 10^8 см и менее. Таким образом, говоря о нагреве коронального вещества посредством омической диссипации электрических токов, следует учитывать тонкую структуру магнитного поля и электрических токов. Подобные утверждения, с приведенными расчетами, содержатся в целом ряде исследований [см., напр., 30,31].

В работе поставлена задача сопоставления динамики крупномасштабного электрического тока в областях с различным уровнем вспышечной активности с временными вариациями температуры в короне над АО и оценки роли электрических токов в процессах нагрева коронального вещества.

2. Данные наблюдений. В работе использованы данные инструментов AIA/SDO [2] и HMI/SDO (Helioseismic and Magnetic Imager) [32]. Доступ к данным осуществляется через сайт Joint Science Operation Center (JSOC) <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html>.

Данные инструмента HMI/SDO о пространственном распределении компонентов вектора магнитного поля на уровне фотосферы Солнца применены для изучения структуры вертикальных и горизонтальных магнитных полей в исследуемых областях, восстановления потенциальных поперечных магнитных полей, обнаружения и вычисления величин локальных вертикальных и крупномасштабных электрических токов. Пространственное разрешение используемых данных HMI/SDO составляет 0.5"/пиксел (порядка 360 км на уровне солнечной фотосферы), временное разрешение в зависимости от типа данных - 45 или 720 с. Здесь использованы SHARP (Spaceweather HMI Active Region Patch) [33] магнитограммы распределения компонентов вектора магнитного поля в фотосфере (цилиндрические координаты, серия данных hmi.sharp_cea_720s) с временным разрешением 720 с.

Для минимизации ошибок в вычислении электрического тока, обусловленных эффектом проекции и с целью вовлечения в расчет максимально возможного количества пикселей, в которых с высокой степенью достоверности разрешена π -неопределенность определения азимута поперечного магнитного поля, время мониторинга каждой области совпадает с временным интервалом нахождения ее в пределах $\pm 35^\circ$ от центрального меридиана (4-6 сут).

Данные инструмента AIA/SDO использованы для оценки интенсивности ультрафиолетового (УФ) излучения в каналах 131, 171, 193 и 211 Å, вычисления температуры на корональных высотах и построения карт распределения температуры в короне над АО вне солнечных вспышек. Используемые данные AIA/SDO представляют собой фотогелиограммы полного диска Солнца, полученные в соответствующем канале УФ-излучения с временным разрешением 12 с и пространственным разрешением 0.6"/пиксел (серия aia.lev1_euv_12s). С применением инструментария, размещенного на сайте JSOC, из полнодисковых фотогелиограмм были вырезаны участки, равные по размерам SHARP-магнитограммам исследуемых областей и соответствующие им по времени.

В работе исследованы 9 АО 24-го цикла солнечной активности. Области для анализа отбирались согласно следующим критериям:

1. На временном интервале мониторинга область должна находиться вблизи фазы максимума своего развития или на финальной стадии эволюции, имея при этом низкие значения скорости затухания магнитного потока в развитом пятне. Максимум развития области оценивался по магнитному потоку.

2. Были выбраны по три области с разным уровнем вспышечной активности - низким, средним и высоким. Под низкой активностью подразумевается фиксация за время мониторинга АО только вспышек рентгеновского класса C (в исследуемой выборке это области NOAA 11899, 12494 и 12674). Под средней активностью подразумевается фиксация в АО за время мониторинга вспышек в том числе рентгеновских классов M (области NOAA 11476, 12222 и 12371). Высокий уровень вспышечной активности означает, что за время мониторинга в АО была зафиксирована минимум одна вспышка рентгеновского класса X1.0 и выше (области NOAA 11890, 12158 и 12192 анализируемой выборки). Подобный отбор АО для анализа позволяет выявить возможную разность в значениях средней температуры в короне над АО в областях с разным уровнем вспышечной активности и существенно различными значениями величины крупномасштабного электрического тока. Для оценки уровня вспышечной активности АО использовались данные спутника GOES-15 (Geostationary Operational Environmental Satellite) о потоке рентгеновского излучения в диапазоне 1-8 Å на орбите Земли, доступные по адресу <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/index.html>.

Основная информация об АО исследуемой выборки представлена в табл. 1.

Первый столбец таблицы отображает номер области (по классификации NOAA), второй - время ее мониторинга. Третий, четвертый и пятый столбцы таблицы содержат данные, связанные со вспышечной активностью области: информацию о наиболее мощной вспышке, зафиксированной в АО за время ее нахождения на видимом диске Солнца (рентгеновский класс и дата), рентгеновский класс и дату наиболее мощной вспышки, зафиксированной в АО за время ее мониторинга, а также вспышечный индекс АО (FI). Согласно определению, величина FI равна 1 (100), если в АО ежедневно за время ее

Таблица 1

ВРЕМЯ МОНИТОРИНГА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ АО

Номер области (NOAA)	Время мониторинга области	Наиболее мощная вспышка	Наиболее мощная вспышка за время мониторинга АО	FI	$\overline{I_{distr}} 10^{12} \text{ A}$	$\langle \log T \rangle$
Области с низкой активностью						
11899	17.11.2013–20.11.2013	M1.0 15.11.2013	C1.7 17.11.2013	3.85	1.34	5.780
12494	05.02.2016–07.02.2016	C5.2 04.02.2016	C1.5 06.02.2016	1.77	8.23	6.117
12674	03.09.2017–06.09.2017	C5.2 30.08.2017	C1.1 04.09.2017	0.76	-5.98	6.183
Области со средней активностью						
11476	09.05.2012–13.05.2012	M5.7 10.05.2012	M5.7 10.05.2012	30.55	-5.01	6.168
12222	30.11.2014–04.12.2014	M6.1 04.12.2014	M6.1 04.12.2014	10.65	-3.83	6.176
12371	20.06.2015–23.06.2015	M7.9 25.06.2015	M6.5 22.06.2015	18.83	23.60	6.208
Области с высокой активностью						
11890	07.11.2013–10.11.2013	X3.3 05.11.2013	X1.1 08.11.2013	55.63	-8.56	6.197
12158	09.09.2014–12.09.2014	X1.6 10.09.2014	X1.6 10.09.2014	13.00	-12.53	6.202
12192	22.10.2014–25.10.2014	X3.1 24.10.2014	X3.1 24.10.2014	101.64	58.14	6.225

нахождения на видимом диске Солнца фиксируется одна вспышка рентгеновского класса C1.0 (X1.0). Более детально об этом параметре можно узнать из [34]. Последние два столбца отображают данные, которые будут более детально описаны и проанализированы ниже - усредненное за время мониторинга области значение крупномасштабного электрического тока $\overline{I_{distr}}$ (здесь и далее по тексту усреднение по времени обозначается горизонтальной чертой сверху) и усредненное за время мониторинга среднее значение температуры в короне над АО (в логарифмической шкале) $\langle \log T \rangle$.

3. *Применяемые методы вычисления анализируемых параметров.* Для получения данных о крупномасштабном электрическом токе $\overline{I_{distr}}$ использована методика, описанная в [22]. Для обнаружения электрического тока,

распределенного на большой площади, осуществляется анализ поперечных магнитных полей АО. С использованием IDL-кода Сакураи [35] восстанавливается потенциальное поперечное магнитное поле области. В каждом пикселе SHARP-магнитограммы АО вектор наблюдаемого поперечного магнитного поля раскладывается на две составляющие - потенциальную $B_{\parallel}$ (компонент направлен вдоль вектора потенциального поперечного магнитного поля) и непотенциальную, $B_{t\perp}$, направленную перпендикулярно вектору потенциального поля. Анализируя пространственное распределение вектора непотенциального компонента поперечного магнитного поля, в окрестности наиболее развитых пятен в АО можно обнаружить регулярные вихревые структуры вектора $\mathbf{B}_{t\perp}$, которые обусловлены присутствием крупномасштабного электрического тока.

Величина крупномасштабного электрического тока для заданного момента времени вычисляется по карте распределения вертикального тока (здесь, как и в других наших работах, применяется интегральный метод вычисления вертикальных электрических токов [36]) как результирующий электрический ток внутри контура C , который определяется по первой за время мониторинга области карте пространственного распределения вектора $\mathbf{B}_{t\perp}$ в окрестности одного из развитых пятен АО, а его форма не меняется на протяжении времени мониторинга области. Построение контура C вокруг пятна задается следующими условиями: 1) внутри контура вектор $\mathbf{B}_{t\perp}$ должен иметь одно преобладающее направление закрутки (по часовой стрелке или против часовой стрелки); 2) контур C очерчивается в некоторой окрестности вблизи пятна, так как вихревое магнитное поле, обусловленное электрическим током, убывает с расстоянием; форма контура C , таким образом, должна быть близка к окружности (овалу).

С целью минимизации ошибок в вычислении величины крупномасштабного тока, которые могут возникать за счет эволюционных изменений в АО (в первую очередь, движений пятен), осуществляется привязка контура C к центру тяжести пятна. Центр тяжести пятна вычисляется отдельно для каждого 12-минутного интервала на протяжении времени мониторинга области. Смещение центра тяжести даже на один пиксель на магнитограмме приводит к смещению контура C на то же количество пикселей. Пример карты распределения вектора $\mathbf{B}_{t\perp}$ и карты распределения вертикального электрического тока для области NOAA 11899 исследуемой выборки представлен на рис.1. Контур C , ограничивающий площадь, внутри которой вычислялась величина крупномасштабного электрического тока, показан на рисунке жирной черной кривой.

Здесь следует сделать три важных замечания относительно размеров и локализации контура C :

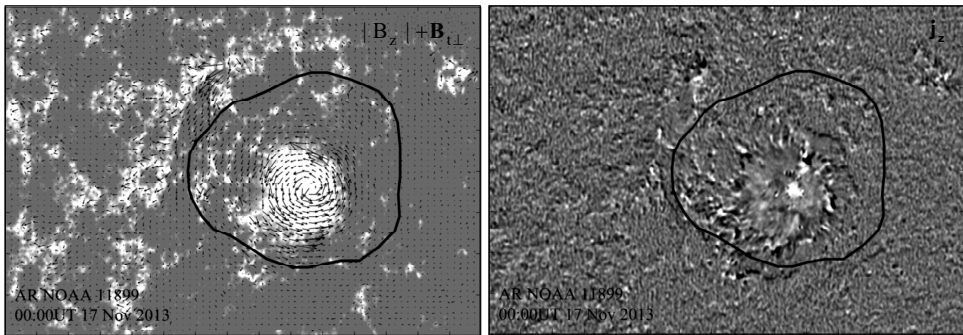


Рис.1. Слева - фрагмент магнитограммы (фон) модуля вертикального компонента вектора магнитного поля $|B_z|$ области NOAA 11899 анализируемой выборки на момент начала ее мониторинга (00:00UT 17 ноября 2013г.), масштабирован от -500 Гс (черное) до 500 Гс (белое) с наложенной картой распределения вектора $B_{t\perp}$ (черные стрелки). Справа - карта распределения плотности локального вертикального электрического тока в АО для того же момента времени, масштабирована от -0.01 А м^{-2} (черное) до 0.01 А м^{-2} (белое). Жирной черной кривой на изображениях показан контур C , ограничивающий площадь, внутри которой вычислялась величина крупномасштабного электрического тока I_{dist} . Размеры изображений $270 \times 145 \text{ Мм}$.

1. Крупномасштабный электрический ток замыкается в пределах АО. Если рассматривать классическую биполярную группу пятен, то в таком случае крупномасштабный электрический ток в окрестности лидирующего пятна будет иметь один знак, а вблизи хвостового пятна АО - противоположный (соответственно, закрутка вектора $B_{t\perp}$ в лидере и хвосте группы пятен будет иметь противоположные направления).

2. Интегрирование по любому иному контуру, равному по площади контуру C , вне окрестностей пятна с явно выраженной вихревой структурой вектора $B_{t\perp}$, дает нам величину результирующего тока, стремящуюся к нулевым значениям.

3. Если контур C сделать большим, охватывающим всю АО, то циркуляция вектора магнитного поля по контуру обращается в нуль, и полный электрический ток внутри такого контура также будет равен нулю [37-39] (экранированность полного электрического тока в проводящей среде [40,41]).

При вычислении температуры короны Солнца используются данные об интенсивности УФ-излучения. Существуют как минимум два подхода. Так, в ряде исследований конца XX-го - начала XXI-го веков для оценки температуры корональных петель использовалось соотношение интенсивностей УФ-излучения в каналах 171 и $195 \text{ \AA}$ (данное соотношение чувствительно к диапазону температур 1.1-1.5 МК) [23] инструмента EIT/SOHO, или же соотношение интенсивностей излучения в диапазонах 284 и $195 \text{ \AA}$ [24], которое чувствительно к температурному интервалу 1.5-2.5 МК.

В основе второго метода лежит формула:

$$F_i = \int_0^{\infty} K_i(T) DEM(T) dT, \quad (1)$$

где F_i - интенсивность (поток) УФ-излучения в i -ом диапазоне, $K_i(T)$ - функция отклика в канале i , а $DEM(T)$ - плазменная дифференциальная мера эмиссии в короне [42]. Для получения данных о температуре в короне с использованием этого метода изначально необходимо вычислить величину DEM , реализовав инверсию выражения (1) и имея данные о величинах K_i и F_i .

В последние десятилетия именно второй подход является доминирующим при определении температуры на корональных высотах. Однако следует учитывать ряд важных моментов, применяя данный метод. Так, величина $K_i(T)$ является не только функцией температуры, но зависит и от ряда иных параметров [43-45], которые не всегда можно учесть в полной мере. В работе [45] неопределенность в вычислении $K_i(T)$ была оценена минимум в 20%. Естественно, что эти ошибки будут влиять на точность определения величины DEM при инверсии.

Помимо этого, инверсия создает несколько проблем с единственностью решений, а в отдельных случаях решение просто не существует. Для реализации инверсии было разработано множество методов [46-51 и др.], каждый из которых отличается как набором исходных уравнений для реализации инверсии выражения (1), так и точностью, и скоростью работы кода. Одним из наиболее надежных методов, существующих на сегодня, является метод регуляризации (Regularized Inversion Method, RIM) [52].

В связи с указанными особенностями второго метода вычисления температуры в короне, автор здесь реализует подход, близкий к первому методу. Детальное его описание, возможности применения, сравнение с существующими подходами, а также возникающие в процессе работы проблемы будут описаны в отдельной статье. Здесь же приводится только краткое описание. Для реализации метода используется информация об интенсивности УФ-излучения в нескольких диапазонах (здесь - каналы AIA/SDO 131, 171, 193 и 211 Å), а также информация о температурной зависимости функции отклика $K_i(T)$ анализируемых диапазонов (рис.2). В данном подходе выполняется следующая последовательность действий:

1. Для каждой из исследуемых АО и для каждого момента времени за весь интервал мониторинга вычисляются суммарные интенсивности УФ-излучения в каждом из анализируемых каналов.

2. Находится отношение суммарных интенсивностей УФ-излучения для пар диапазонов F_{193}/F_{171} , F_{193}/F_{211} , F_{193}/F_{131} , F_{171}/F_{211} , F_{171}/F_{131} , F_{211}/F_{131} (для

дальнейшей оценки средней температуры в короне) и отношение интенсивностей излучения в каждом пикселе фотогелиограмм для тех же пар каналов (для построения карт распределения температуры в короне).

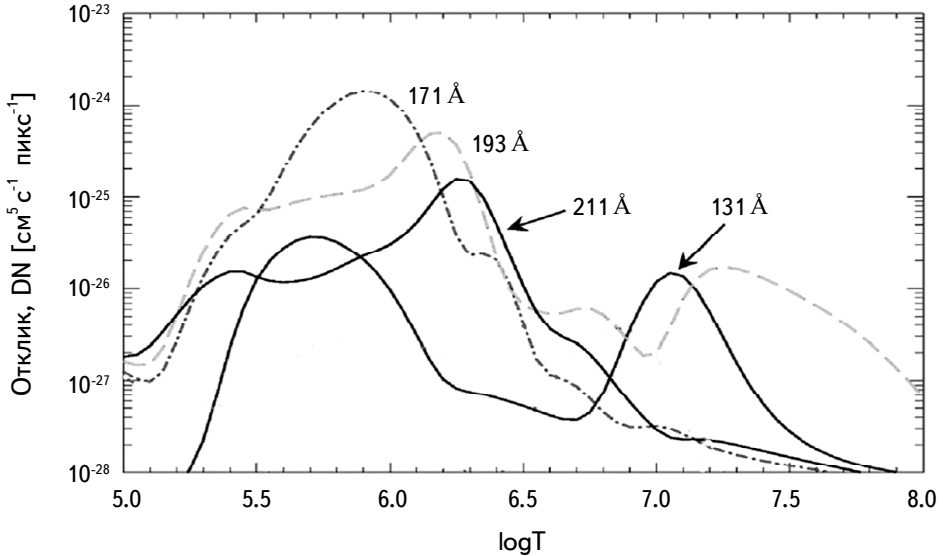


Рис.2. Зависимость функция отклика (K_i) - температура ($\log T$) для анализируемых каналов УФ-излучения инструмента AIA/SDO.

3. Сопоставляя график температурной зависимости функции отклика $K_i(T)$ исследуемых диапазонов и полученные значения отношений суммарных интенсивностей УФ-излучения, делается оценка средней температуры в короне над АО для каждого момента времени за весь временной интервал мониторинга области.

4. Сопоставляя график температурной зависимости функции отклика $K_i(T)$ для исследуемых диапазонов и попиксельные значения отношений интенсивностей УФ-излучения, строятся карты распределения температуры в короне над АО для каждого момента времени за весь временной интервал мониторинга области.

Таким образом, как уже было сказано, применяемый подход оценки температуры в короне над АО ближе к первому из описанных методов, однако отличается от него использованием функции отклика $K_i(T)$ как маркера соответствия определенной температуре или температурному диапазону.

4. Результаты.

4.1. Зависимость между крупномасштабным электрическим током и средней температурой в короне над АО. С применением

вышеописанных методик, в областях анализируемой выборки были обнаружены крупномасштабные электрические токи I_{distr} , рассчитаны их величины, а также вычислена средняя температура в короне над АО ($\langle \log T \rangle$). В каждом случае были сопоставлены между собой динамика крупномасштабного электрического тока и временные вариации средней температуры в короне над АО за весь временной интервал мониторинга области. Информация об усредненных за время мониторинга величинах $\overline{I_{distr}}$ и $\langle \log T \rangle$ представлена в шестом и седьмом столбцах табл.1. Из данных двух последних столбцов таблицы следует:

1. Полученные значения усредненной за время мониторинга средней температуры в короне над АО мало различаются для областей анализируемой выборки и находятся в диапазоне $\langle \log T \rangle = 6.00 - 6.25$ (1.0-1.8 МК). Единственным исключением является область NOAA 11899, для которой $\langle \log T \rangle = 5.780$ (0.6 МК). Более низкое значение температуры можно объяснить тем, что область NOAA 11899 на время мониторинга находилась на финальной стадии эволюции. Это, в свою очередь, указывает на потенциальную (или близкую к потенциальной) конфигурацию магнитных полей в АО и, следовательно, на минимальное количество процессов и явлений, обусловленных непотенциальными магнитными полями (электрическими токами), которые могли играть определенную роль в нагреве коронального вещества. Данное предположение подтверждается очень низким значением величины распределенного тока в области NOAA 11899 (см. шестой столбец табл.1).

2. Незначительный разброс в значениях средней температуры в короне над АО при достаточно большом разбросе в значениях величины крупномасштабного электрического тока возможно указывает на то, что электрические токи нагревают корональное вещество в стационарном (квазистационарном) режиме.

Изучение графиков временных вариаций величины крупномасштабного электрического тока и средней температуры в короне над АО (см. рис.3, показаны наиболее интересные случаи) позволяет сделать следующие выводы:

1. Вне вспышечных событий средняя температура в короне над АО за время их мониторинга для подавляющего большинства случаев равна $\langle \log T \rangle = 6.2$ (~1.5 МК). Учитывая существенно различные величины и динамику крупномасштабного тока в областях с разным уровнем вспышечной активности и отсутствие существенных изменений в величине средней температуры, высказанное выше предположение о квазистационарном нагреве коронального вещества за счет омической диссипации крупномасштабных электрических токов подтверждается.

2. Во время солнечных вспышек высоких рентгеновских классов фиксируется повышение средней температуры в короне над АО до значений

$\langle \log T \rangle = 6.3 - 6.5$ (2.0-3.2 МК). При этом корреляция между изменениями величины средней температуры и динамикой крупномасштабного электрического

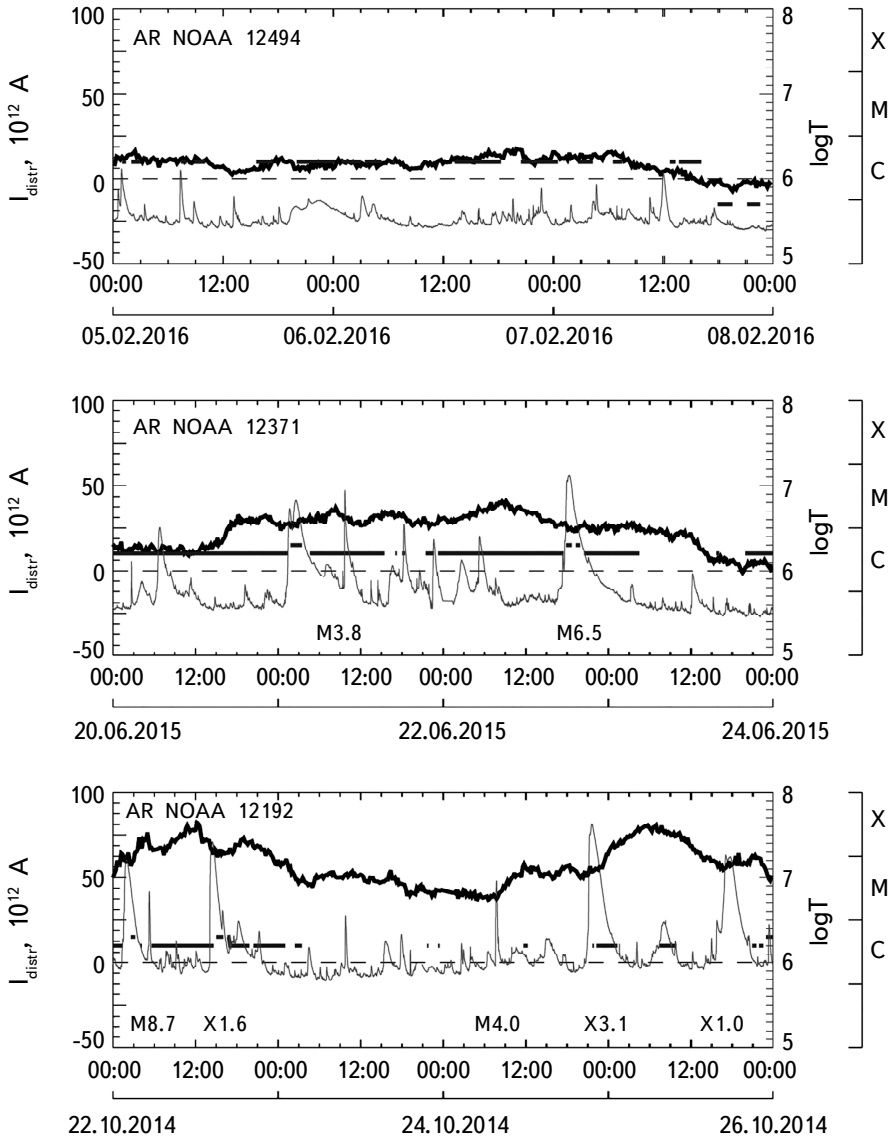


Рис.3. Динамика крупномасштабного электрического тока I_{distr} (черная жирная кривая) и средней температуры в короне над АО $\langle \log T \rangle$ (серая жирная кривая) для трех областей анализируемой выборки с разным уровнем вспышечной активности. Продемонстрированы наиболее интересные случаи (более детально см. текст). Тонкой серой кривой показан поток рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1-8 Å на орбите Земли (по данным космического аппарата GOES-15). Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек, ассоциированных с анализируемыми АО.

тока отсутствует. Токи, однако, способны нагревать отдельные корональные структуры до температур в 10 МК и выше на временных масштабах, характерных для вспышечных процессов, при условии филаментации токовых каналов до масштабов порядка 10^7 см, что подтверждается расчетами, выполненными в [30,31,53]. Однако можно утверждать, что дополнительный нагрев короны во время вспышек обусловлен не только электрическими токами, но и рядом иных процессов на корональных высотах.

3. На графике временных вариаций крупномасштабного электрического тока и средней температуры в короне для области NOAA 12494 (рис.3, верхний график) можно отметить падение средней температуры в короне над АО до $\langle \log T \rangle = 5.7$ (0.5-0.6 МК) при одновременном падении величины крупномасштабного электрического тока до значений, близких к нулю. Подобная картина наблюдается также для области NOAA 11899 анализируемой выборки: средняя температура над АО, как это следует из данных табл.1, составляет $\langle \log T \rangle = 5.780$ (0.6 МК), при этом усредненное за время мониторинга значение величины крупномасштабного электрического тока (с учетом возможных ошибок вычислений) стремится к нулевым значениям. Данные наблюдения указывают на выключение механизма нагрева коронального вещества над АО посредством омической диссипации крупномасштабных электрических токов.

4.2. Карты распределения температуры в короне над АО вне вспышечных событий. Вероятное обнаружение каналов крупномасштабного электрического тока на корональных высотах. Кроме расчета средней температуры, для каждой области анализируемой выборки были построены карты распределения температуры в короне. Пример подобной карты для АО NOAA 12371 на момент начала ее мониторинга (00:00 UT 20 июня 2015г.) представлен на нижней панели рис.4. Верхняя панель рис.4 является фрагментом полнотелесной фотогелиограммы короны Солнца, который содержит данные об интенсивности УФ-излучения над анализируемой областью в канале 171 Å инструмента AIA/SDO для того же момента времени. Можно убедиться, что петельные структуры, видимые на фотогелиограмме, достаточно хорошо воссоздаются и на карте распределения температуры, а полученные значения температуры находятся в допустимых пределах. Данный результат позволяет убедиться, что созданная программа оценки температуры в короне над АО работает корректно.

Для областей NOAA 12192 и 12371, обладающих наиболее высокими значениями величины крупномасштабного электрического тока (см. шестой столбец табл.1), построение карт распределения температуры в короне позволило обнаружить вне вспышечных событий для АО NOAA 12192 локализованную область с температурой ≥ 10 МК, а для области NOAA 12371 - горячие

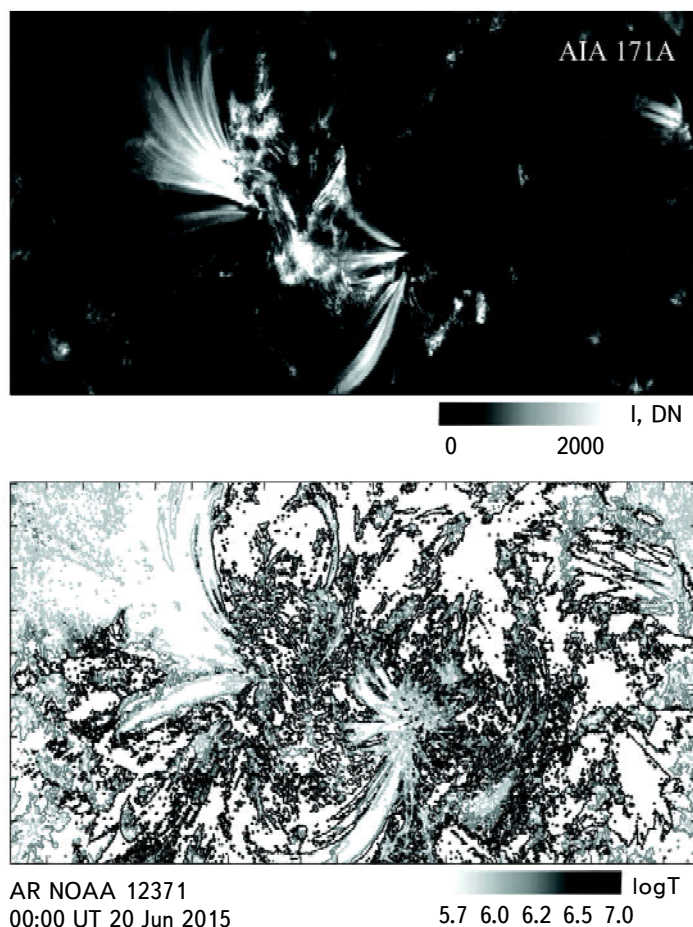


Рис.4. Вверху - фотогелиограмма области NOAA 12371 анализируемой выборки в канале 171 Å инструмента AIA/SDO на момент начала ее мониторинга. Внизу - карта распределения температуры в короне над АО для того же момента времени. Видно, что петельные корональные структуры достаточно хорошо воссоздаются созданной программой.

корональные петли с такой же температурой (рис.5, отмечены стрелками). Есть основания полагать, что подобные высокотемпературные корональные структуры обозначают местоположение канала крупномасштабного электрического тока, а высокая температура в них обусловлена омической диссипацией электрического тока. Для области NOAA 12192 существование достаточно большого по абсолютной величине электрического тока на корональных высотах подтверждается результатами численного моделирования, выполненного в 2016г. в работе [54]. Рис.2d, е в данной статье демонстрирует присутствие электрического тока в АО, распространяющегося до высот порядка 30 Мм и пространственно совпадающего с предполагаемым ранее нами [22] направлением крупно-

масштабного тока. Следует обратить внимание на характерный масштаб токового канала: в области NOAA 12192 предполагаемый канал крупномасштабного электрического тока имеет ширину порядка $(3-4) \cdot 10^8$ см, а в АО NOAA 12371 - еще меньше. Согласно расчетам, выполненным в [30,31], время диссипации электрического тока в подобных условиях будет порядка 10^6 с, что может рассматриваться как стационарное (квазистационарное) энерговыделение.

5. *Выводы и обсуждение.* Сопоставление динамики крупномасштабного электрического тока с временными вариациями средней температуры в короне для 9 АО с разным уровнем вспышечной продуктивности, а также построение

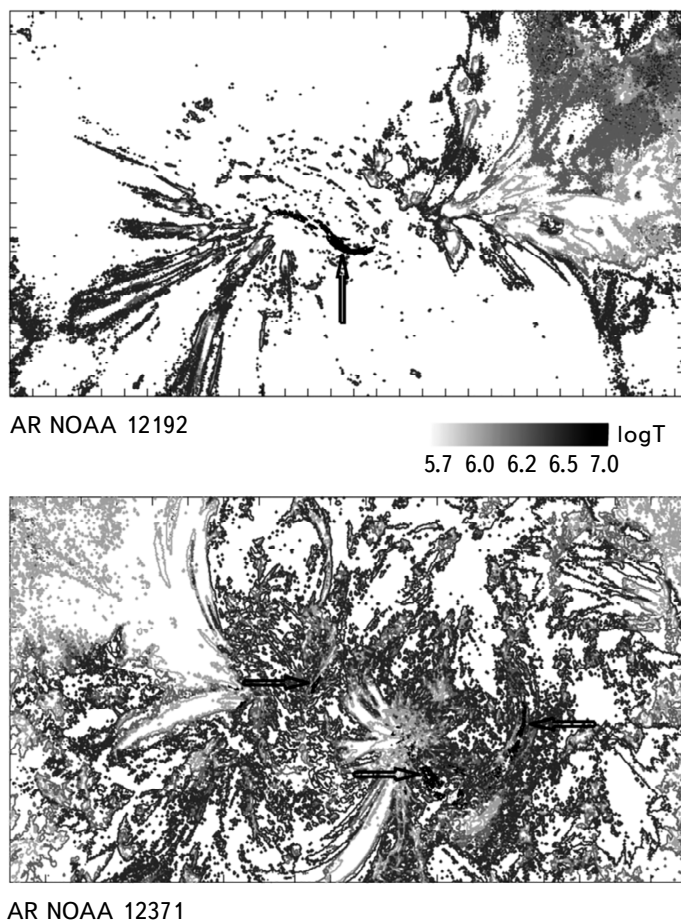


Рис.5. Вверху - карта распределения температуры в короне над АО NOAA 12192 на момент начала ее мониторинга. Видна структура с температурой выше 10 МК (отмечена стрелкой), которую можно ассоциировать с каналом крупномасштабного электрического тока в короне. Внизу - карта распределения температуры в короне над АО NOAA 12371 на момент начала ее мониторинга. Стрелками на рисунке отмечены горячие петельные структуры, которые, вероятно, также связаны с крупномасштабным электрическим током.

карт распределения температуры над АО вне вспышечных событий, позволяет сделать следующие выводы:

1. Нагрев коронального вещества за счет омической диссипации крупномасштабных электрических токов, вероятно, идет в стационарном режиме.

2. Повышение средней температуры в короне над АО во время солнечных вспышек до значений $\langle \log T \rangle = 6.3 - 6.5$ (2.0-3.2 МК) обусловлено не только диссипацией крупномасштабного электрического тока, но и рядом иных процессов на корональных высотах.

3. Для АО NOAA 12494 обнаружено снижение значений средней температуры в короне с $\langle \log T \rangle = 6.2$ (1.5 МК) до $\langle \log T \rangle = 5.7$ (0.5-0.6 МК) при одновременном падении величины крупномасштабного электрического тока до нуля. Также для области NOAA 11899 зафиксировано низкое значение усредненной за время мониторинга средней температуры в короне ($\langle \log T \rangle = 5.780$). Для этой же области отмечено и крайне низкое значение величины усредненного за время мониторинга крупномасштабного тока ($\overline{I_{distr}} = 1.34 \cdot 10^{12}$ А). Данные наблюдения указывают на выключение механизма нагрева короны за счет омической диссипации электрических токов при нулевых (в пределах ошибок вычислений) значениях крупномасштабного тока.

4. В областях NOAA 12192 и 12371 при построении карт распределения температуры в короне вне вспышечных событий обнаружены горячие структуры с температурой ≥ 10 МК, которые, по-видимому, обозначают собой местоположение канала крупномасштабного электрического тока на корональных высотах. Для области NOAA 12192 это предположение подтверждается результатами выполненного в 2016г. численного моделирования.

Автор признателен коллегам по исследовательской группе, сотрудникам Отдела физики Солнца и солнечной системы В.И.Абраменко, А.С.Куценко, О.К.Куценко, А.В.Жуковой, А.А.Плотникову, Д.В.Литвишко и Р.А.Сулеймановой за активное обсуждение работы. Автор благодарит рецензента за интерес к работе и полезные замечания. Исследование выполнено при поддержке грантом РФФИ №22-72-00124.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Республика Крым,
Россия, e-mail: yuriy_fursyak@mail.ru

LARGE-SCALE ELECTRIC CURRENTS IN CORONAL HEATING PROCESSES ABOVE SOLAR ACTIVE REGIONS

Yu.A.FURSYAK

The aim of this paper is to study the role of large-scale electric currents extending into the upper layers of the solar atmosphere in the processes of solar corona heating. To detect and calculate the magnitude of the large-scale electric current, data on the distribution of the magnetic field vector components in the photosphere provided by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument on board the Solar Dynamics Observatory (SDO) were used. To estimate the temperature in the corona above active regions (ARs), we used photoheliograms of the solar corona in the ultraviolet radiation channels 131, 171, 193, and 211 Å provided by the Atmospheric Imaging Assembly (AIA/SDO) instrument. The dynamics of the large-scale electric current and average temperature in 9 ARs with different levels of flare productivity has been studied, and maps of the spatial distribution of temperature in the corona above the ARs have been constructed. The following results are obtained: 1. The heating of the coronal matter due to the ohmic dissipation of large-scale electric currents proceeds in a stationary mode. 2. The increase in the average temperature in the corona above the AR during solar flares to $\langle \log T \rangle = 6.3 - 6.5$ (2.0-3.2 MK) is due not only to the heating of coronal structures by large-scale electric currents, but also to other processes at coronal heights. 3. For the NOAA 11899 and 12494 ARs, a decrease in the values of the average temperature in the corona to $\langle \log T \rangle = 5.7$ (0.5-0.6 MK) was found with a simultaneous decrease of the large-scale electric current to zero values. These observations indicate that the mechanism of coronal heating due to ohmic dissipation of electric currents is turned off at zero (within the calculation errors) values of the large-scale electric current. 4. In the regions NOAA 12192 and 12371, when constructing temperature distribution maps outside flare events, hot coronal structures with a high (≥ 10 MK) temperature were found, which probably mark the location of a large-scale electric current channel at coronal heights. For the AR NOAA 12192, this assumption is confirmed by the results of the numerical simulation performed in 2016.

Keywords: *Sun: active regions: magnetic field: electric currents: ultraviolet radiation: coronal heating*

ЛИТЕРАТУРА

1. *K. de Jager*, Строение и динамика атмосферы Солнца, М., Издательство иностранной литературы, 1962.
2. *J.R.Lemen, A.M.Title, D.J.Akin et al.*, *Solar Phys.*, **275**, 17, 2012.
3. *W.D.Pesnell, B.J.Thompson, P.C.Chamberlin*, *Solar Phys.*, **275**, 3, 2012.
4. *E.Antonucci, D.Alexander, J.L.Culhane et al.*, in: *The Many Faces of the Sun: A Summary of the Results from NASA's Solar Maximum Mission*. Berlin: Springer, 331, 1998.
5. *P.L.Bornmann*, in: *The Many Faces of the Sun: A Summary of the Results from NASA's Solar Maximum Mission*. Berlin: Springer, 301, 1998.
6. *J.V.Hollweg*, *Astrophys. J.*, **277**, 392, 1984.
7. *J.Ionson*, *Astrophys. J.*, **276**, 357, 1984.
8. *D.B.Melrose, G.A.Dulk*, *Astrophys. J.*, **282**, 308, 1984.
9. *E.N.Parker*, *Astrophys. J.*, **330**, 474, 1988.
10. *A.A.Galeev, R.Rosner, S.Serio et al.*, *Astrophys. J.*, **243**, 301, 1981.
11. *D.C.Spicer*, in: *Mechanisms of Chromospheric and Coronal Heating*. Berlin: Springer-Verlag, p.547, 1991.
12. *P.F.Chen*, *Living Rev. Solar Phys.*, **8**, 1, 2011.
13. *K.Shibata, T.Magara*, *Living Rev. Solar Phys.*, **8**, 6, 2011.
14. *T.Wiegmann, T.Sakurai*, *Living Rev. Solar Phys.*, **9**, 5, 2012.
15. *T.Wiegmann, J.K.Thalmann, S.K.Solanki*, *Astron. Astrophys. Rev.*, **22**, 78, 2014.
16. *M.C.M.Cheung, H.Isobe*, *Living Rev. Solar Phys.*, **11**, 3, 2014.
17. *B.Schmieder, V.Archontis, E.Pariat*, *Space Sci. Rev.*, **186**, 227, 2014.
18. *N.E.Raouafi, S.Patsourakos, E.Pariat et al.*, *Space Sci. Rev.*, **201**, 1, 2016.
19. *S.R.Sprangler*, *Astrophys. J.*, **670**, 841, 2007.
20. *В.И.Абраменко, С.И.Гопасюк*, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **76**, 147, 1987.
21. *V.I.Abramenko, S.I.Gopasiuk, M.B.Ogir*, *Solar Phys.*, **134**, 287, 1991.
22. *Yu.A.Fursyak, A.S.Kutsenko, V.I.Abramenko*, *Solar Phys.*, **295**, 19, 2020.
23. *M.J.Aschwanden, J.S.Newmark, J.-P.Delaboudiniere et al.*, *Astrophys. J.*, **515**, 842, 1999.
24. *M.J.Aschwanden, D.Alexander, H.Hurlburt et al.*, *Astrophys. J.*, **531**, 1129, 2000.
25. *F.Reale, G.Peres*, *Astrophys. J.*, **528**, L45, 2000.
26. *V.V.Zaitsev, K.Shibasaki*, *Astron. Rep.*, **49**, 1009, 2005.
27. *T.G.Cowling*, *Magnetohydrodynamics*, London: Interscience Publ., Great Britain, 1957.
28. *G.D.Holman*, *Astrophys. J.*, **293**, 584, 1985.
29. *S.R.Sprangler*, *Nonlin. Processes Geophys.*, **16**, 443, 2009.
30. *A.A.Solov'ev*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **515**, 4981, 2022.
31. *A.A.Solov'ev, A.Riechokainen, V.V.Smirnova et al.*, *Geomagnetism and Aeronomy*, **62**, 1021, 2022.
32. *P.H.Scherrer, J.Schou, R.I.Bush et al.*, *Solar Phys.*, **275**, 207, 2012.
33. *M.G.Bobra, X.Sun, J.T.Hoeksema et al.*, *Solar Phys.*, **289**, 3549, 2014.

34. *V.I.Abramenko*, *Astrophys. J.*, **629**, 1141, 2005.
35. *T.Sakurai*, *Solar Phys.*, **76**, 301, 1982.
36. *Yu.A.Fursyak*, *Geomagnetism and Aeronomy*, **58**, 1129, 2018.
37. *A.A.Solov'ev, E.A.Kirichek*, *Mon. Not. Roy. Astro. Soc.*, **505**, 4406, 2021.
38. *A.A.Соловьев*, *Астрон. ж.*, **88**, 1111, 2011.
39. *X.Sun, J.T.Hoeksema, Y.Liu et al.*, *Astrophys. J.*, **748**, 77, 2012.
40. *E.N.Parker*, *Cosmical Magnetic Fields. Part 1*, Oxford: Clarendon Press, 1979.
41. *E.N.Parker*, *Conversations on electric and magnetic field in the Cosmos*, Princeton: Princeton Univ. Press, 2007.
42. *X.Cheng, J.Zhang, S.H.Saar et al.*, *Astrophys. J.*, **761**, 62, 2012.
43. *H.P.Summers*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **169**, 663, 1974.
44. *N.R.Badnell, M.G.O'Mullane, H.P.Summers et al.*, *Astron. Astrophys.*, **406**, 1151, 2003.
45. *P.G.Judge*, *Astrophys. J.*, **708**, 1238, 2010.
46. *A.M.Thompson*, *Astron. Astrophys.*, **240**, 209, 1990.
47. *B.C.Monsignori-Fossi, M.Landini*, *Mem. Soc. Astron. It.*, **63**, 767, 1992.
48. *V.Kashyap, J.J.Drake*, *Astrophys. J.*, **503**, 450, 1998.
49. *L.Golub, E.E.Deluca, A.Sette et al.*, in: *The Solar-B Mission and the Forefront of Solar Physics*, *ASP Conf. Ser.*, **325**, 217, 2004.
50. *F.F.Goryaev, S.Parenti, A.M.Urnov et al.*, *Astron. Astrophys.*, **523**, A44, 2010.
51. *M.J.Aschwanden, P.Boerner*, *Astrophys. J.*, **732**, 81, 2011
52. *I.G.Hannah, E.P.Kontar*, *Astron. Astrophys.*, **539**, A146, 2012.
53. *V.V.Zaitsev, P.V.Kronshtadtov*, *Radiophys. Quantum Electron.*, **59**, 169, 2016.
54. *C.Jiang, S.T.Wu, V.Yurchyshyn et al.*, *Astrophys. J.*, **828**, 62, 2016.