

УДК 523.985.3

ЭВОЛЮЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА И ИХ СВЯЗЬ С МОЩНЫМИ ВСПЫШКАМИ

© 2024 г. А. Б. Нечаева^{1,*}, И. В. Зимовец^{1,2,**}, В. С. Зубик^{2,***}, И. Н. Шарыкин^{1,****}

¹ Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

² Физтех-школа физики и исследований им. Ландау (МФТИ Физтех), Долгопрудный, Россия

*e-mail: nechaeva.workspace@gmail.com

**e-mail: ivanzim@iki.rssi.ru

***e-mail: chernikovasya@gmail.com

****e-mail: ivan.sharykin@phystech.edu

Поступила в редакцию 03.08.2023 г.

После доработки 13.09.2023 г.

Принята к публикации 23.11.2023 г.

Изучение эволюции магнитного поля и электрических токов в активных областях Солнца на длительном интервале времени представляет интерес для понимания процессов накопления и выделения энергии в них, приводящих к разнообразным явлениям, оказывающим влияние на космическую погоду. В этой работе на основе фотосферных векторных магнитограмм инструмента *Helioseismic and Magnetic Imager* на борту *Solar Dynamics Observatory* был проведен анализ эволюции ряда характеристик магнитного поля и вертикального электрического тока в трех активных областях 11158, 11675 и 12673, произведших вспышки классов М и X, на протяжении времени от их зарождения в восточном полушарии, во время прохождения по солнечному диску и до исчезновения вблизи западного лимба с шагом 2 часа. Рассматриваемые характеристики включали в себя: показатель степенной функции плотности вероятности абсолютного значения плотности вертикального электрического тока, максимум абсолютного значения плотности вертикального тока, знаковый и беззнаковый вертикальный ток, беззнаковые вертикальный и горизонтальный магнитные потоки, энергия нелинейного бессилового и потенциального магнитного поля, свободная магнитная энергия, а также количество островов с сильными вертикальными токами. Найдены некоторые закономерности в поведении рассматриваемых характеристик при эволюции активных областей, в частности относительно возникновения вспышек. Рассчитаны коэффициенты корреляции между парами всех рассматриваемых характеристик. Дополнительно, показана перспективность подхода М. Ашвандена для прогнозирования максимального рентгеновского класса вспышки на основе вычисления энергии потенциального магнитного поля в активных областях. Полученные результаты могут использоваться при прогнозировании мощных солнечных вспышек.

DOI: 10.31857/S0016794024020027, EDN: DZNAWA

1. ВВЕДЕНИЕ

Активные области (АО) на Солнце представляют собой места локального выхода сильного магнитного поля (напряженность до нескольких кГс) из-под фотосферы, концентрирующегося в виде пор и солнечных пятен. В развитых крупных группах солнечных пятен суммарный беззнаковый магнитный поток достигает значений $\sim 10^{22}$ Мкс и выше [Zwaan, 1987; van Driel-Gesztelyi and Green, 2015]. АО, ассоциирующиеся с группами солнечных пятен, характеризуются более интенсивным ультрафиолетовым и рентгеновским излучением относительно

других участков солнечной короны. В них происходят разнообразные явления солнечной активности, такие как нагрев корональных петель, корональные джеты, формирование волокон и эрупция протуберанцев, солнечные вспышки, корональные выбросы массы (КВМ) и др. Поэтому АО интересны как с точки зрения фундаментальных исследований космической плазмы, так и с точки зрения прикладного аспекта изучения и прогнозирования космической погоды. Магнитное поле играет ключевую роль в процессах, происходящих в АО. Такие мощнейшие явления солнечной активности, как вспышки и КВМ, представляют собой процессы

выделения свободной магнитной энергии, запасаемой в АО в результате всплытия магнитных потоков из конвективной зоны и их перемещений друг относительно друга вследствие локальных течений плазмы и замороженности магнитного поля в плазму [Toriiumi and Wang, 2019]. Свободная магнитная энергия, определяемая как избыток магнитной энергии относительно энергии потенциального (безтокового) магнитного поля при заданных граничных условиях, связана с электрическими токами [Прист, 1985; Priest and Forbes, 2002; Sun et al., 2012; Tadesse et al., 2014]. По этой причине исследование электрических токов в АО является важной задачей, которой занимаются более полувека, начиная с пионерских работ А.Б. Северного и его коллег в Крымской астрофизической обсерватории [Северный, 1988]. Современные обзоры по исследованиям электрических токов в АО на Солнце и их связи с процессами энерговыделения представлены в работах [Fleishman and Pevtsov, 2018; Barnes and Leka, 2018; Schmieder and Aulanier, 2018; Степанов и Зайцев, 2019; Zimovets and Sharykin, 2022].

В настоящее время магнитное поле рутинно измеряется только на уровне фотосферы. Соответственно, электрические токи определяются на фотосфере из соответствующего уравнения Максвелла (закона Ампера) в дифференциальной форме (в системе СГС, где магнитная проницаемость $\mu \approx 1$):

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \quad (1)$$

или в интегральной форме:

$$\oint_l \mathbf{H} dl = \frac{4\pi}{c} \mathbf{I}. \quad (2)$$

В разных работах для расчета тока примерно с одинаковым успехом используют как уравнение в дифференциальной, так и интегральной формах.

Так как данные о векторе магнитного поля обычно имеются только на одном узком фотосферном слое, то из наблюдений доступна информация лишь о вертикальной (или радиальной) компоненте электрического тока. Однако стоит отметить немногочисленные работы, в которых делались оценки горизонтальной составляющей электрического тока на фотосфере [Зверева и Северный, 1970; Puschmann et al., 2010; Fursyak and Abramenko, 2017; Nechaeva et al., 2021]. Показано, что плотность горизонтальных токов может быть сопоставимой или может в несколько раз превышать плотность вертикальных токов в фотосфере. Это дает указания на важную роль горизонтальных токов, по крайней мере, в нижних слоях солнечной атмосферы в АО и необходимость их дальнейшего детального изучения. Однако в данной работе мы не будем касаться этого вопроса.

В работе [Zimovets et al., 2020a] выполнено статистическое исследование связи между источниками жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек и вертикальными электрическими токами, где показано, что наличие участков (островов, лент) с сильными вертикальными токами ($|j_z| > 9 \cdot 10^3$ статампер/см²) можно рассматривать как необходимое, но недостаточное условие для происхождения вспышек рентгеновских классов C и выше. В той же работе обнаружено, что функция плотности вероятности (англ. “probability density function”) абсолютного значения плотности вертикальных токов $PDF(|j_z|)$ в АО (определяемая в каждом заданном интервале значений $[|j_z[i]|, |j_z[i]| + d|j_z|]$ как отношение числа пикселей со значениями $|j_z|$ в этом интервале к общему числу пикселей в АО) в интервалах времени до/после (~ 0.5 ч) солнечных вспышек имеет специфический вид гауссова “колокола” для малых значений токов ($|j_z| < 9 \cdot 10^3$ статампер/см²) и степенного “хвоста” для более сильных токов. Области слабых вертикальных токов связаны с фоновыми магнитными полями, тогда как области с сильными токами отождествляются в основном с полутенью пятен вблизи линии инверсии магнитной полярности (ЛИМП), где происходят вспышки. Подробнее функция $PDF(|j_z|)$ и методика ее определения описаны в работах [Zimovets et al., 2020b; Nechaeva et al., 2022].

В работе [Zimovets et al., 2020b] показано, что на коротком интервале времени (менее 1 часа) не удастся обнаружить изменения функции $PDF(|j_z|)$ в АО до и после вспышки. Однако на более длительном масштабе времени эволюции АО исследование вида $PDF(|j_z|)$ не проводилось. Также не проводилось исследование связи параметров функции $PDF(|j_z|)$ с другими более стандартными параметрами магнитного поля и электрических токов (такими как суммарный беззнаковый магнитный поток, максимальный и полный электрический ток, магнитная энергия и др.) при эволюции АО. Изучение поведения степенного “хвоста” $PDF(|j_z|)$ представляет основной интерес, поскольку соответствующие ему сильные токи связаны со вспышечным энерговыделением в АО. Степенной показатель наклона “хвоста” может рассматриваться как удобная характеристика распределения плотности тока в АО — чем меньше абсолютное значение показателя степени, тем более пологое (жесткое) распределение $PDF(|j_z|)$, а значит больший процент элементов (пикселей) содержит более сильные токи и, следовательно, в АО содержится больше свободной магнитной энергии.

Цель нашей работы — восполнить обозначенный выше пробел на основе анализа эволюции степенного показателя “хвоста” функции $PDF(|j_z|)$ и ряда других параметров вертикальных токов и магнитного поля (включая магнитную энергию, полученную на основе экстраполяции

в потенциальном и нелинейном бессиловом приближении) на длительном (около 10 суток) масштабе времени эволюции АО — от их зарождения в восточной полусфере до захождения за западный лимб, включая фазу всплытия магнитного потока. Основной задачей является вычисление коэффициентов корреляции между парами рассматриваемых параметров, минимальных и средних значений параметров перед мощными вспышками (рентгеновских классов M и X), что имеет значение для их прогнозирования [Bobra and Couvidat, 2015; Fursyak et al., 2021; Ишков, 1998; 2023]. Дополнительная задача — проверить идею, предложенную в [Aschwanden, 2020] для прогнозирования максимально возможного рентгеновского класса вспышки в АО на основе ее магнитной энергии, и оценить точность такого вида прогноза.

Отметим, что в этой работе мы исследуем изменение обозначенных характеристик только на длительном масштабе эволюции АО (несколько суток) и не рассматриваем детали изменений вертикальных токов и компонент вектора магнитного поля непосредственно во время вспышек (десятки минут и менее), чему посвящено значительное количество работ (например, [Tan et al., 2006; Sun et al., 2012; Janvier et al., 2014; Musset et al., 2015; Barczynski et al., 2020; Sharykin et al., 2020; Artemyev et al., 2021]).

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В этой работе мы используем векторные магнитограммы, полученные инструментом *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) на борту космического аппарата *Solar Dynamics Observatory* (SDO) [Scherger et al., 2012]. Используются подготовленные фотосферные магнитограммы серии “*Space-weather HMI Active Region Patches*” (SHARP), которые определены для локальных участков Солнца, соответствующих активным областям [Bobra et al., 2014]. Для анализа отобраны три АО, в которых происходили мощные вспышки (M- и X-классов), и для которых можно было наблюдать их зарождение в восточном полушарии: NOAA АО 11158 (февраль 2011 г.), 11675 (февраль 2013 г.) и 12673 (сентябрь 2017 г.). Мониторинг каждой АО производился на интервале времени в 11 дней с шагом 2 ч до момента приближения области к западному лимбу. Мы не используем все доступные магнитограммы с шагом 12 мин, что сделано для уменьшения объема обрабатываемых данных. Шаг 2 ч приемлем для изучения эволюции АО на длительном интервале времени 11 дней.

В табл. 1 приведен список изучаемых АО, даты начала и конца наблюдения, гелиографические широты и долготы центров АО для этих дат и список произошедших в них за это время вспышек M- и X-классов. В силу большой многочисленности, мы не приводим

более слабые вспышки (классов C и ниже), к тому же они представляют меньший интерес для космической погоды. Отметим, что АО 11158 и 12673 характеризовались повышенной вспышечной активностью и по этой причине ранее уже исследовались в ряде работ. В частности, в АО 11158 произошла первая вспышка класса X 24-го цикла солнечной активности (SOL2011-02-15T01:44, X2.2), различные аспекты которой изучались многими авторами [например, Schrijver et al., 2011; Sun et al., 2012; Wang et al., 2012; Janvier et al., 2014; Musset et al., 2015; Linton et al., 2023]. В АО 12673 наблюдались очень сильные магнитные поля ~5 кГс [Anfinogentov et al., 2019] и в ней произошла серия вспышек класса X, включая самую мощную вспышку (SOL2017-09-06T11:53, X9.3) 24-го цикла [например, Jiang et al., 2018; Lysenko et al., 2019; Sharykin and Kosovichev, 2018; Wang et al., 2018; Yang et al., 2018]. АО 11675 не отличалась сильной вспышечной активностью. В ней произошла всего одна вспышка M-класса (SOL2013-02-17T15:45, M1.9) примерно тогда, когда наблюдался максимальный суммарный беззнаковый магнитный поток в этой области [Sharykin et al., 2017; Зимонец и др., 2022]. Мы рассматриваем эту АО с умеренной вспышечной активностью для сравнения ее эволюции с эволюцией АО 11158 и 12673 со значительно более сильной активностью.

Для каждой рассматриваемой АО по указанным фотосферным векторным магнитограммам в сферической системе координат построены зависимости от времени следующих параметров вертикального электрического тока и магнитного поля:

- показатель степени $PDF(|j_z|)$, где $j_z(t)$ вычислялся по формуле (1), а процесс построения функции распределения плотности вертикальных токов описан в работах [Zimovets et al., 2020b; Nechaeva et al., 2022];
- знаковый и беззнаковый полный вертикальный электрический ток $sum J_z(t)$ и $sum |J_z(t)|$, соответственно, просуммированный по всем пикселям АО;
- максимум абсолютного значения вертикального тока $max |J_z(t)|$ в АО;
- суммарное число пикселей рассматриваемой АО, содержащих сильные вертикальные поля ($B_z > 1000$ Гс или, $B_z > 100$ Гс) и сильные вертикальные токи ($|j_z| > 9 \cdot 10^3$ статампер/см²);
- беззнаковые суммарные (полные) потоки вертикального и горизонтального магнитного поля $sum |\Phi_z(t)|$ и $sum |\Phi_h(t)|$, соответственно, которые считались по следующим формулам:

$$sum |\Phi_h(t)| = s \cdot \sum_{i,j} \sqrt{B_\varphi^2(\varphi_i, \theta_j, t) + B_\theta^2(\varphi_i, \theta_j, t)}, \quad (3)$$

$$sum |\Phi_z(t)| = s \cdot \sum_{i,j} |B_r(\varphi_i, \theta_j, t)|, \quad (4)$$

Таблица 1. Список рассматриваемых АО с датой начала и конца наблюдения, гелиографическими долготами и широтами Стонихерста центров АО на эти даты, а также вспышками классов М и X, произошедшими в этих АО. Указаны дата, время начала и рентгеновский класс вспышек

Номер АО	Начало наблюдения, (долгота; широта) [градусы]	Конец наблюдения, (долгота; широта) [градусы]	Мощные вспышки в АО
NOAA 11158	11.02.2011 г., (−41.27; −21.08)	22.02.2011 г., (96.41; −21.08)	13.02.2011 г. 17:28 M6.6 14.02.2011 г. 17:20 M2.2 15.02.2011 г. 01:44 X2.2 16.02.2011 г. 01:32 M1.0 16.02.2011 г. 07:35 M1.1 16.02.2011 г. 14:19 M1.6 18.02.2011 г. 09:55 M6.6 18.02.2011 г. 12:59 M1.4
NOAA 11675	16.02.2013 г., (−45.60; 12.63)	25.02.2013 г., (82.45; 12.63)	17.02.2013 г. 15:45 M1.9
NOAA 12673	29.08.2017 г., (−86.82; −9.24)	09.09.2017 г., (70.79; −9.24)	04.09.2017 г. 05:36 M1.2 04.09.2017 г. 15:11 M1.5 04.09.2017 г. 18:05 M1.0 04.09.2017 г. 18:46 M1.7 04.09.2017 г. 19:59 M1.5 04.09.2017 г. 20:28 M5.5 04.09.2017 г. 22:10 M2.1 05.09.2017 г. 01:03 M4.2 05.09.2017 г. 03:42 M1.0 05.09.2017 г. 04:33 M3.2 05.09.2017 г. 17:37 M2.3 06.09.2017 г. 08:57 X2.2 06.09.2017 г. 11:53 X9.3 06.09.2017 г. 15:51 M2.5 06.09.2017 г. 19:21 M1.4 06.09.2017 г. 23:33 M1.2 07.09.2017 г. 04:59 M2.4 07.09.2017 г. 09:49 M1.4 07.09.2017 г. 10:11 M7.3 07.09.2017 г. 14:20 X1.3 07.09.2017 г. 23:50 M3.9 08.09.2017 г. 02:19 M1.3 08.09.2017 г. 03:39 M1.2 08.09.2017 г. 07:40 M8.1 08.09.2017 г. 15:09 M2.9 08.09.2017 г. 23:33 M2.1

где s — площадь одного пикселя, суммирование по всем пикселям АО, удовлетворяющим маске пространственного расположения пикселей в АО $BITMAP \geq 33$ и маске качества определения магнитного поля $CONF_DISAMBIG = 90$ магнитограмм SHARP, полученных по данным SDO/HMI [Hoeksema et al., 2014]. Отметим, что “поток” горизонтального поля — это условное понятие. Он имеет ту же размерность, что и классический поток радиального (вертикального) магнитного поля через площадь поверхности Солнца в АО, и является интегральной характеристикой горизонтального поля в АО, удобной для сравнения с физически понятной интегральной характеристикой радиального поля;

- полная энергия потенциального E_{potf} и нелинейно-го бессилового E_{nlfff} магнитного поля в АО, а также полная свободная магнитная энергия E_{free} в АО:

$$E_{potf}(t) = \sum \frac{B_{potf}^2(x, y, z, t)}{8\pi} \Delta x \Delta y \Delta z, \quad (5)$$

$$E_{nlfff}(t) = \sum \frac{B_{nlfff}^2(x, y, z, t)}{8\pi} \Delta x \Delta y \Delta z, \quad (6)$$

$$E_{free}(t) = E_{nlfff}(t) - E_{potf}(t), \quad (7)$$

где суммирование сделано по всем трехмерным прямоугольным ячейкам (вокселям) с фиксированными линейными размерами $\Delta x = 1000$ км, $\Delta y = 1000$ км, $\Delta z = 1000$ км, на которые разбита АО.

Экстраполяция магнитного поля из фотосферы в корону с использованием векторных магнитограмм HMI/SDO SHARP в потенциальном и нелинейном бессиловом приближениях сделана в декартовых координатах с помощью программного средства “*GX Simulator*” [Nita et al., 2023]. Отметим, что экстраполяция магнитного поля в АО 12673 для некоторых моментов времени успешно проводилась с помощью более ранней версии этих кодов в работе [Anfinogentov et al., 2019], а в работе [Zimovets et al., 2018] с помощью других кодов делалась магнитная экстраполяция в нелинейном бессиловом приближении для АО 11158 в окрестности вспышки X2.2 SOL2011-02-15T01:44.

Отметим, что для построения $PDF(|j_z|)$ используется плотность вертикального тока, а в других параметрах используется вертикальный ток $J_z = j_z \cdot s$.

Выбор порога для вертикальных токов сделан на основании того, что значение $|j_z| = 9 \times 10^3$ статампер/см² составляет примерно тройное стандартное отклонение гауссова распределения $PDF(|j_z|)$, соответствующего фоновым значениям вертикальных токов, и примерно является переходной точкой, после которой поведение функции распределения приобретает степенной характер [Zimovets et al., 2020a, b; Nechaeva et al., 2022].

Кривые эволюции (зависимости от времени) перечисленных параметров с ошибками их вычисления, основанными на информации об ошибках компонент вектора магнитного поля (в данных SHARP), представлены на рис. 1 для АО 11158, на рис. 2 для АО 11675, на рис. 3 для АО 12673. Отметим, что ошибки магнитных энергий не приводятся по причине практической невозможности их расчета. На рис. 1–3 первая (верхняя) панель: показатель степени $PDF(|j_z|)$ (черная кривая) и максимум абсолютного значения вертикального тока $\max|J_z|$ (серая кривая). Вторая панель: знаковая (черная кривая) и беззнаковая (серая кривая) суммы вертикального тока $\sum J_z$ и $\sum |J_z|$ соответственно. Третья панель: суммарные беззнаковые потоки вертикального (черная кривая) и горизонтального (серая кривая) магнитного поля $\sum |\Phi_z|$ и $\sum |\Phi_h|$, соответственно. Четвертая панель: энергия нелинейного бессилового E_{nliff} (черная сплошная кривая) и потенциального E_{potf} (черная пунктирная кривая) магнитного поля, свободная магнитная энергия E_{free} (серая сплошная кривая). Пятая панель: нормированное количество островов (отдельных участков АО) с плотностью вертикального тока $|j_z| > 3 \times 10^3$ статампер/см² (штрихпунктирная кривая), $|j_z| > 9 \times 10^3$ статампер/см² (пунктирная кривая) и $|j_z| > 18 \cdot 10^3$ статампер/см² (сплошная кривая). Цвета кривых соответствуют цветам осей ординат, на которых показаны их значения. Серые участки на графиках выделяют те интервалы времени, где достоверность значений параметров сомнительна из-за удаленности

центра АО от центрального меридиана (в диапазоне гелиодолгот 45° – 60° — светло-серый цвет, выше 60° градусов — темно-серый цвет). Вертикальные точечные и пунктирные линии показывают время пика вспышек М и Х классов соответственно.

Дополнительно были изучены пространственные участки АО с сильными вертикальными токами и магнитным полем. Описание результатов приведено в разделе 3.2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Общая эволюция параметров в АО

Из рис. 1–3 можно видеть общие характерные сходства и некоторые различия эволюции рассматриваемых электромагнитных параметров трех АО.

На начальных этапах формирования АО происходит выход магнитных потоков величиной порядка $\sim(0.5\text{—}1.5) \times 10^{22}$ Мкс, что также сопровождается появлением полного беззнакового вертикального тока до $\sim 2 \times 10^{23}$ статампер (см. раздел 3.2) и избытка свободной магнитной энергии $< 4 \times 10^{31}$ эрг. Степенной спектр распределения $PDF(|j_z|)$ в этой фазе “мягкий” при показателе степени от примерно -8 до -5 в АО 11675 и 12673, хотя в АО 11158 он достигает иногда примерно -3.5 . Длительность этой фазы разная: для АО 11158 примерно 2 суток, для АО 11675—1 сут и для АО 12673—6 сут. Можно отметить, что чем сильнее последующая вспышечная активность в АО, тем длиннее эта фаза. Эта фаза сменяется фазой быстрого всплытия нового магнитного потока (см. числовые значения в разделе 3.5), длящейся $\sim 1\text{—}2$ сут, которая сопровождается также ростом горизонтального магнитного потока, полного беззнакового вертикального тока, ростом энергии магнитного поля, включая и рост свободной магнитной энергии. На этой фазе уже начинают происходить изредка вспышки класса М. Частота мощных вспышек увеличивается по достижении локального максимума выхода магнитного потока, когда начинают также происходить вспышки класса Х. Показатель степени $PDF(|j_z|)$ в этой фазе увеличивается и находится в диапазоне от -4 до -2 , т. е. спектр плотности вертикального тока становится более “жестким”. После окончания фазы быстрого всплытия магнитный поток может продолжать всплывать еще несколько суток с меньшим темпом, как в случае АО 11158 и 12673 с мощной вспышечной активностью, или может начать плавно падать, как в случае АО 11675 с относительно слабой вспышечной активностью. В этой АО не было вспышек классов М и Х на фазе спада магнитного потока (и других параметров). Интересно отметить, что полная энергия магнитного поля (экстраполированного в потенциальном и нелинейном бессиловом приближениях) продолжает плавно возрастать в АО 11158 и 12673 длительное время почти вплоть

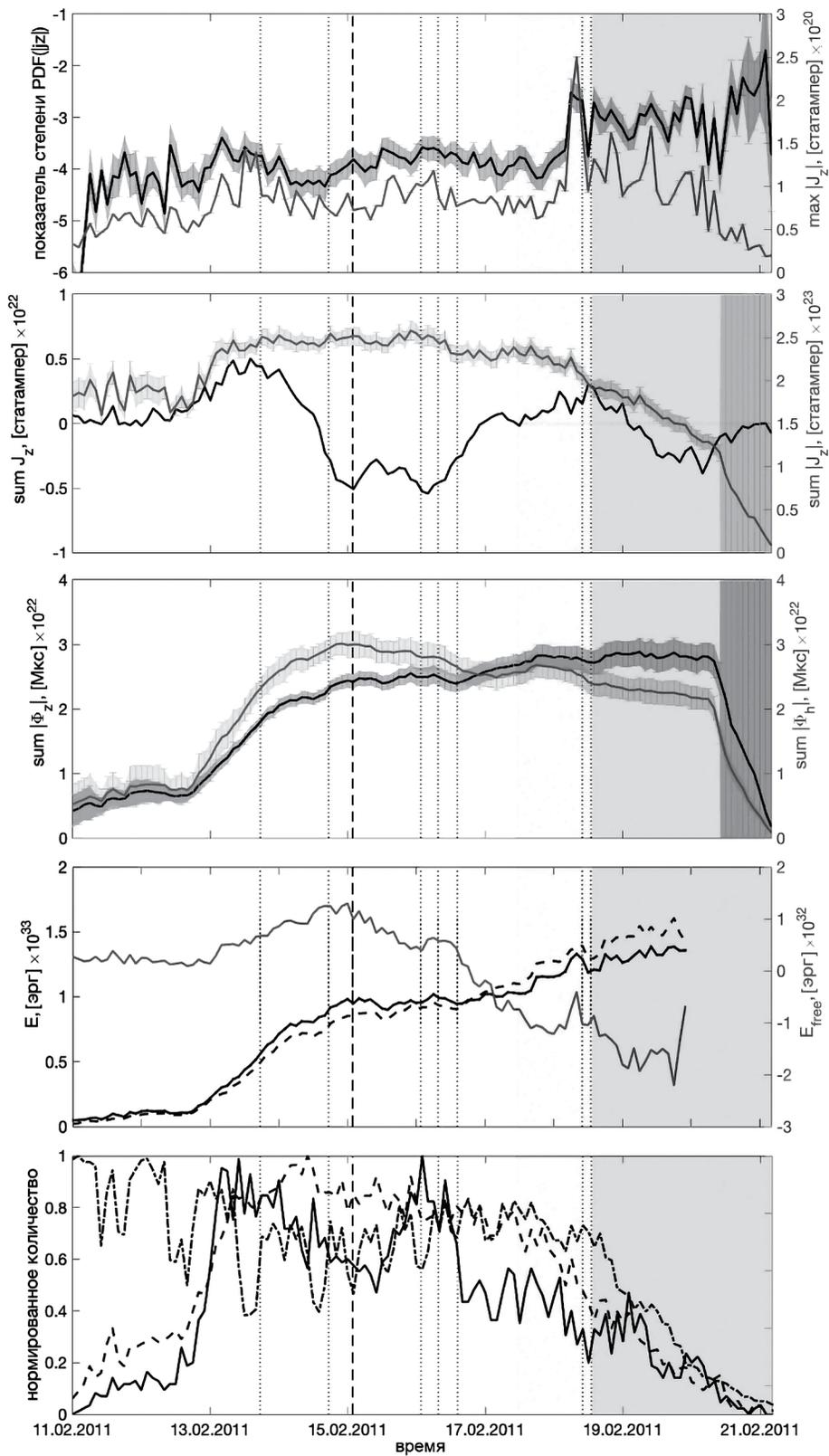


Рис. 1. Кривые эволюции рассматриваемых параметров магнитного поля и электрических токов в АО NOAA 11158 с 11.02.2011 г. по 22.02.2011 г.

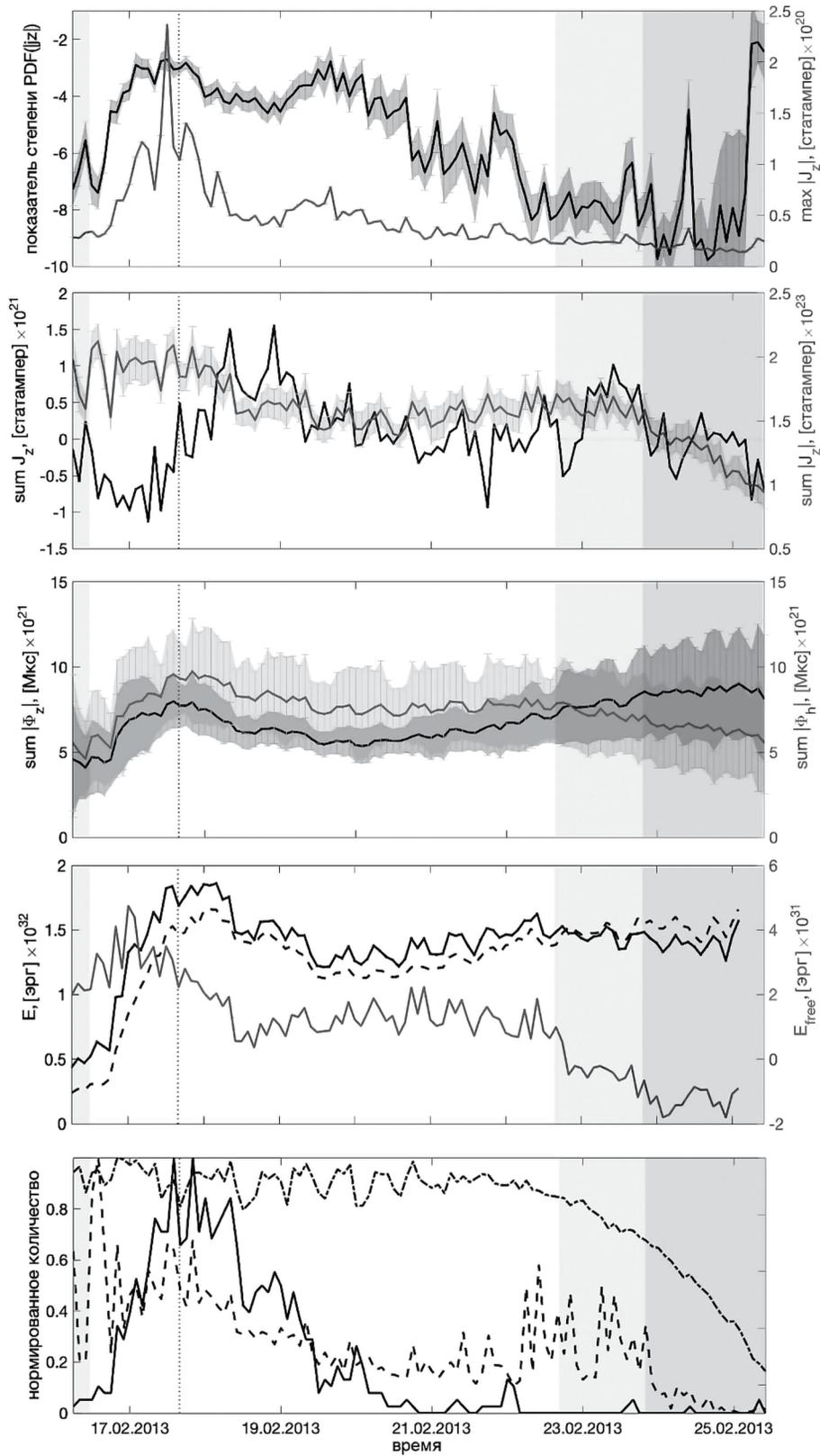


Рис. 2. Аналогично рис. 1, но для АО NOAA 11675 с 16.02.2013 г. по 25.02.2013 г.

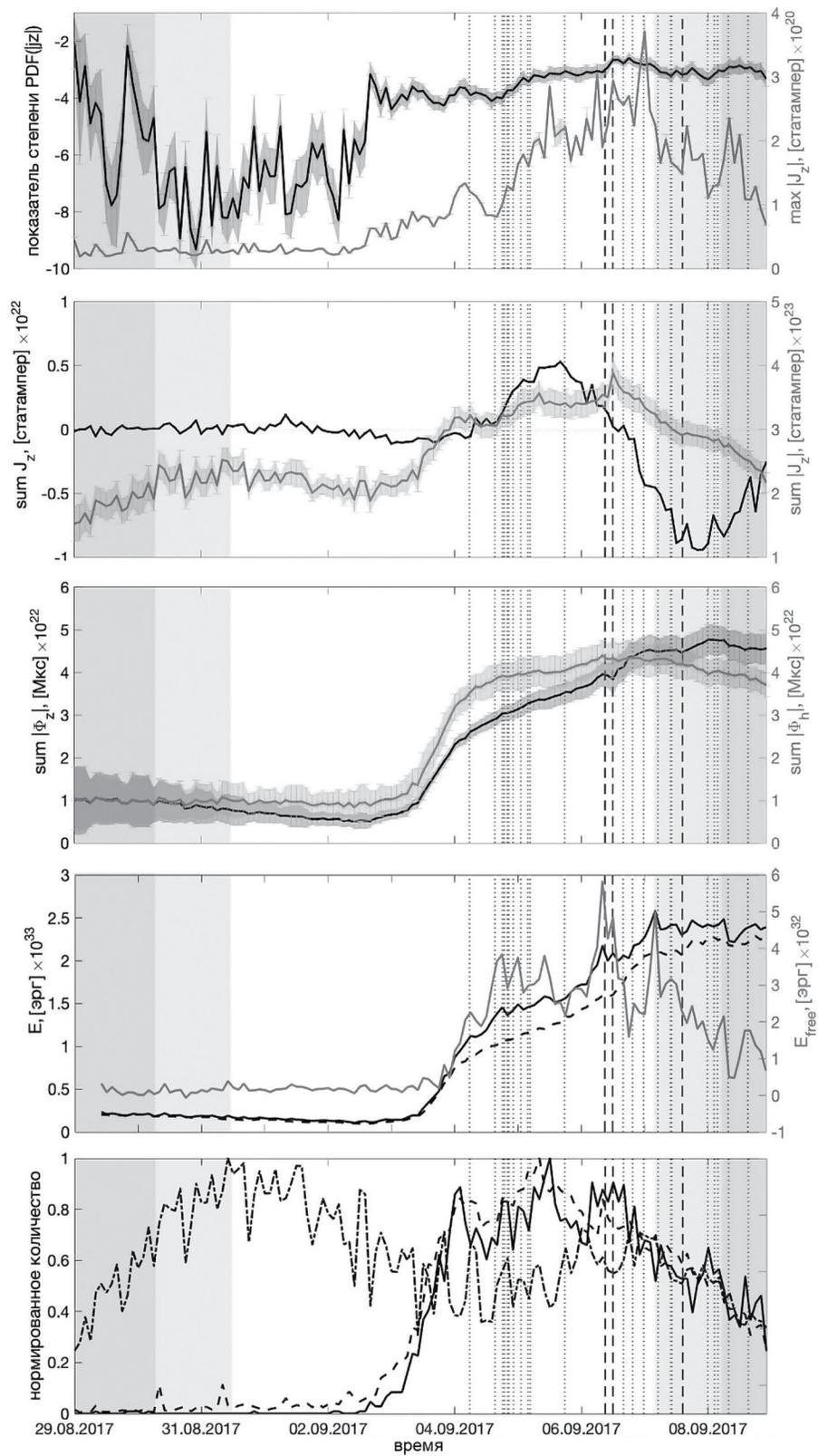


Рис. 3. Аналогично рис. 1, но для АО NOAA 12673 с 29.08.2017 г. по 09.09.2017 г.

до окончания наблюдений, тогда как свободная магнитная энергия достигает пика в окрестности времени самой мощной вспышки, произошедшей в этих АО (SOL2011-02-15T01:44 X2.2 и SOL2017-09-06T11:53 X9.3 соответственно). Полный беззнаковый горизонтальный магнитный поток превышает вертикальный примерно до этого же времени, а для АО 11675 почти все время наблюдений. Полный беззнаковый вертикальный ток продолжает возрастать примерно до времени достижения пика горизонтального магнитного потока, после чего начинает плавно снижаться. Данное наблюдение можно интерпретировать тем, что вертикальный ток определяется горизонтальными составляющими вектора магнитного поля. Отметим, что для АО 11675 удается наблюдать фазу спада магнитных потоков (примерно до 21.02.2013, после чего ошибки магнитных потоков становятся слишком большими), тогда как для АО 11158 и особенно для АО 12673 этого сделать не получается из-за их приближения к западному лимбу и захода за лимб.

3.2. Пространственная эволюция электрических токов АО

На нижних панелях рис. 1–3 представлены нормированные (на максимум) кривые числа островов (замкнутых контуров) вертикального электрического тока. Штрихпунктирными линиями показаны кривые количества островов с $|j_z| > 3 \times 10^3$ статампер/см², пунктирными — с $|j_z| > 9 \times 10^3$ статампер/см², сплошными — с $|j_z| > 18 \times 10^3$ статампер/см². На этих панелях можно заметить, что резкий рост числа островов токов с надфоновыми (с $|j_z| > 9 \times 10^3$ статампер/см²) значениями начинается в то же время, когда быстро возрастают магнитные потоки. Однако в АО 11675 уже на раннем этапе появилось много рассредоточенных областей надфоновых вертикальных токов, количество которых сначала уменьшается, а затем с резким возрастанием магнитного потока снова начинает увеличиваться. Подобная ситуация, когда на самом раннем этапе зарождения АО выходящие из-под фотосферы магнитные трубки содержат тонкую структуру электрического тока, после чего трубки сливаются в более крупные объекты с более простой и регулярной структурой электрического тока к моменту полноценного формирования солнечных пятен, описана в работе [Grigoryev and Ermakova, 2002]. Последующее наблюдаемое увеличение количества (и размеров) островов электрического тока связано с более быстрым выходом нового магнитного потока, сопровождаемым сдвиговыми и скручивающими движениями. Детальный анализ течений плазмы, эволюции магнитного потока и вертикального тока в АО 12673 в этой фазе, проведенный в работе [Wang et al., 2018], показал, что большая часть вертикального электрического тока формируется именно за счет горизонтальных движений плазмы вблизи ЛИМП в АО, а не содержится во всплывающих магнитных трубках.

Для того чтобы получить представление о пространственной эволюции вертикальных электрических токов при эволюции АО, были построены карты вертикальной и горизонтальной компонент фотосферного магнитного поля с нанесенными на них контурами вертикальных токов различной величины.

В качестве примеров см. правые панели на рис. 4–6 (для АО 11158, 11675 и 12673, соответственно). На каждой карте черным цветом нанесены большие острова сильного вертикального электрического тока ($|j_z| \geq 9 \times 10^3$ статампер/см², с площадью более 100 пикселей), серым показана линия инверсии магнитной полярности, светло-серым и темно-серым показаны участки, где $|B_z| > 500$ Гс и $|B_z| > 1000$ Гс, соответственно. По осям абсцисс и ординат — гелиопроекции координаты X и Y , соответственно, в угловых секундах (север сверху, запад справа). Карты показаны для четырех моментов времени: на начальных этапах развития АО (первая сверху панель), в период быстрого всплытия магнитных потоков (вторая сверху панель), непосредственно перед самой мощной вспышкой (третья сверху панель) и на ранней фазе диссипации АО (нижняя панель). Эти карты показывают, что перед тем, как в АО начинают происходить мощные вспышки, структура токов эволюционирует от состояния с большим числом изолированных участков (островов) достаточно слабых токов, которые можно считать фоновыми ($3 \times 10^3 < |j_z| < 9 \times 10^3$ статампер/см²), с редкими разрозненными островами более сильных токов в окрестности участков сильного магнитного поля (в пятнах), до достаточно большой и связанной структуры сильных токов в областях сильного магнитного поля с гораздо меньшим числом пикселей с фоновым током в областях слабого поля. В АО 11158 после вспышки X2.2 появляется заметно больше участков слабых фоновых токов. Однако пока структура еще сохраняет достаточно сложный связный вид, происходит несколько вспышек М-класса. Стоит также отметить, что резкое уменьшение числа пикселей в АО 11158 с сильным током после 19.02.2011 г. связано с тем, что область начинает смещаться ближе к западному лимбу, и общее число значимых пикселей магнитограмм SHARP уменьшается. В АО 11675 происходит всего одна вспышка М-класса, перед которой также наблюдается рост числа отдельных островов с сильными токами и формирование их в единую структуру в области солнечных пятен. В АО 12673 в начале ее формирования несколько раз наблюдается чередующееся появление и исчезание маленьких областей (порядка нескольких угловых секунд) надфоновых токов (см. выше). Далее структура начинает “разрастаться” и сохраняет свой вид во время сильных вспышек с 06.09.2017 г. по 09.09.2017 г.

На левых панелях рис. 4–6 можно видеть характер изменения $PDF(|j_z|)$ с ходом эволюции АО, а именно появление степенного “хвоста”

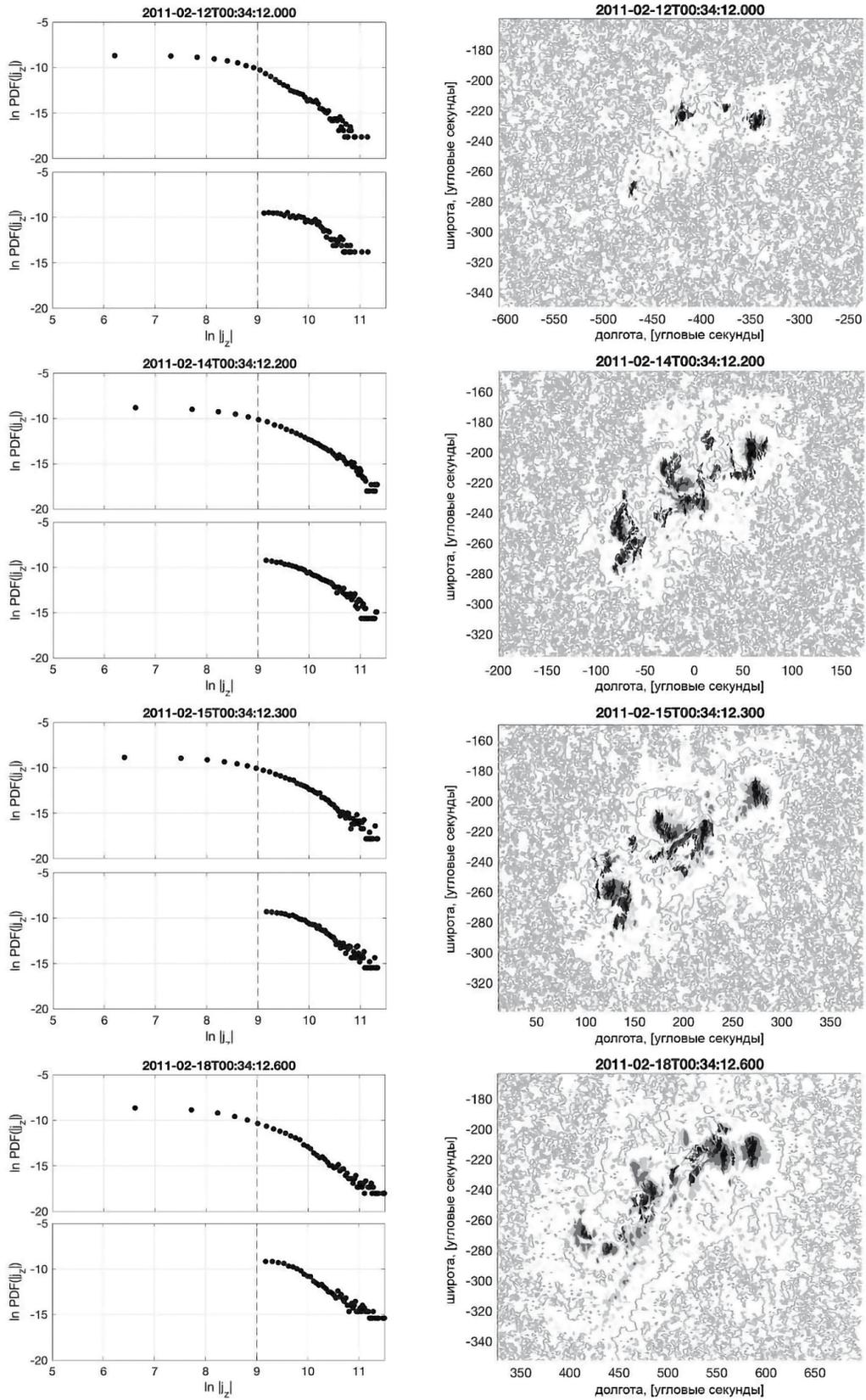


Рис. 4. PDF($\ln|j_z|$) (слева) и карты островов сильного электрического тока (справа) для четырех моментов времени (сверху вниз): в начале зарождения АО, на фазе быстрого всплывтия магнитного потока, перед началом самых мощных вспышек и в один из более поздних моментов времени для АО NOAA 11158.

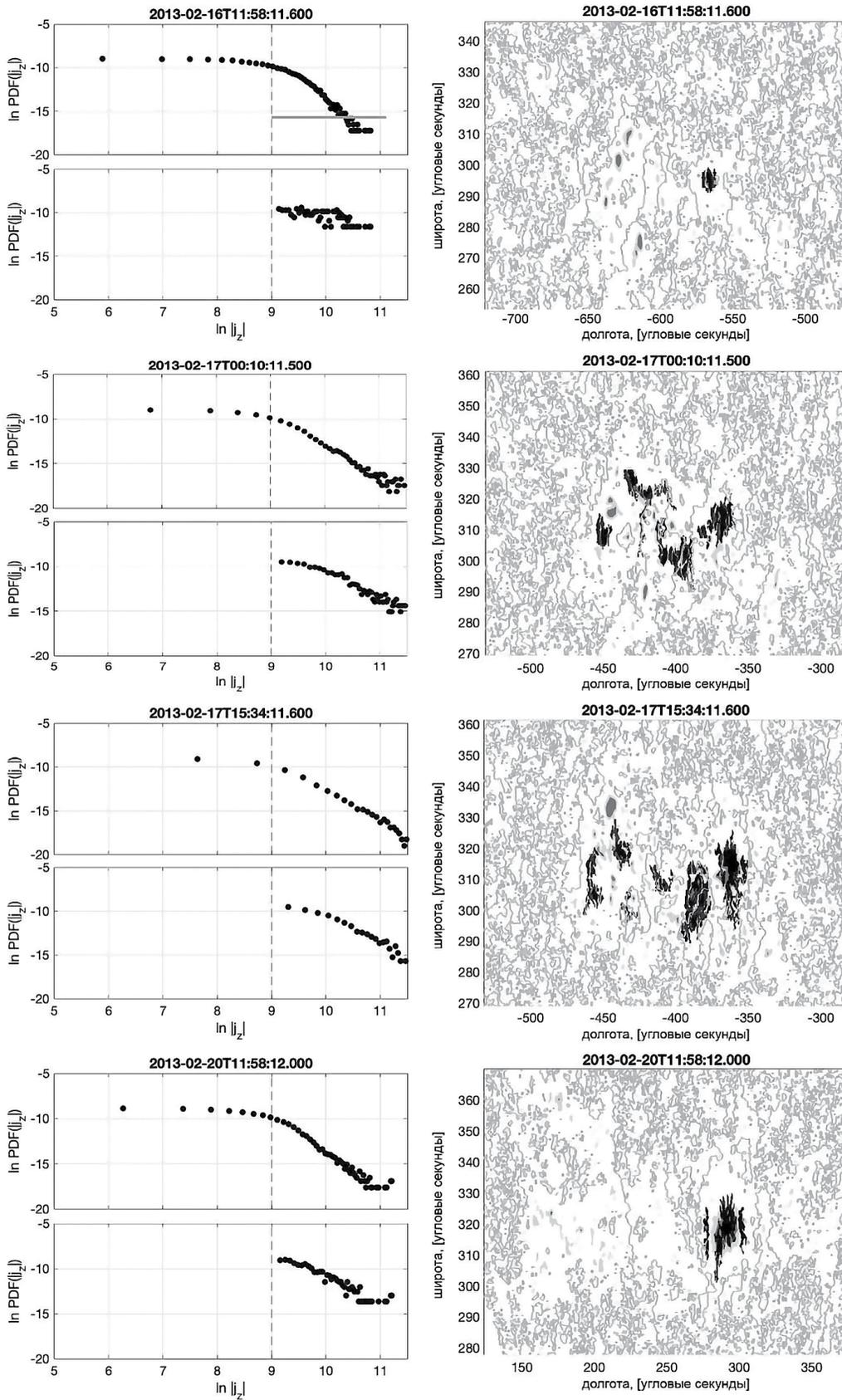


Рис. 5. Аналогично рис. 4, но для АО NOAA 11675.

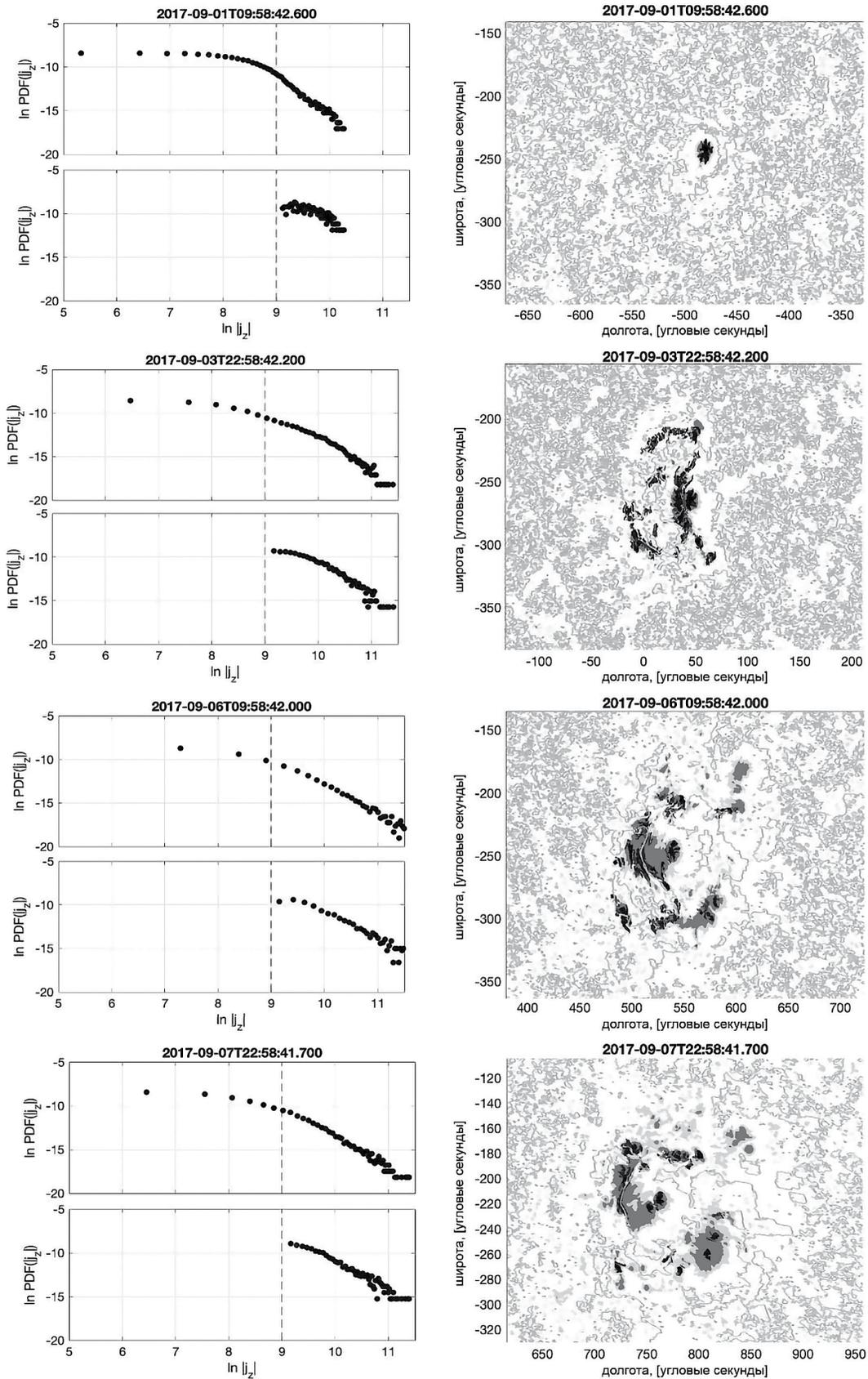


Рис. 6. Аналогично рис. 4, но для АО NOAA 12673.

и уменьшение его наклона (уменьшение абсолютного значения индекса степени) в процессе возрастания магнитного потока, что подтверждает формирование в АО большого количества участков с сильными токами на этих этапах. Для каждого момента времени приведены два распределения $PDF(|j_z|)$: верхнее — для всей рассматриваемой АО, нижнее — только для обозначенных островов сильных токов.

3.3. Корреляция между парами анализируемых

Для всех пар рассматриваемых параметров каждой из трех АО вычислены линейные коэффициенты корреляции (cc) Пирсона, значения которых приведены в табл. 2–4.

В целом, можно отметить, что для АО 11158 и 12673 с высокой вспышечной активностью значимые корреляции (>0.5) обнаруживаются для значительно большего числа пар разных параметров, чем для более слабой АО 11675. С другой стороны, есть ожидаемая значимая корреляция между показателем степени $PDF(|j_z|)$ и максимумом модуля вертикального электрического тока для АО 11675 (0.67 ± 0.14) и 12673 (0.77 ± 0.11), тогда как для АО 11158 этот коэффициент составляет лишь 0.23 ± 0.22 .

Для всех трех АО значимые корреляции (выше 0.5) обнаруживаются у следующих пар параметров:

- суммарный беззнаковый горизонтальный магнитный поток и максимум модуля вертикального электрического тока ($sum|\Phi_h|$ и $max|J_z|$);

- суммарный беззнаковый горизонтальный и вертикальный магнитные потоки ($sum|\Phi_h|$ и $sum|\Phi_z|$);
- суммарный беззнаковый горизонтальный магнитный поток и энергия потенциального магнитного поля ($sum|\Phi_h|$ и E_{potf});
- суммарный беззнаковый горизонтальный магнитный поток и энергия нелинейного бессилового магнитного поля ($sum|\Phi_h|$ и E_{nlfff});
- энергия потенциального и нелинейного бессилового магнитных полей (E_{potf} и E_{nlfff}).

Для последних двух параметров (E_{potf} и E_{nlfff}) коэффициенты корреляции самые большие из всех — от 0.94 (в АО 11675) до 0.99 (в АО 11158 и 12673). При этом свободная магнитная энергия E_{free} коррелирует хуже с E_{potf} и E_{nlfff} для мощных АО 11158 и 12673 и вообще не коррелирует с ними для более слабой АО 11675.

На рис. 7а–и показаны графики парной зависимости этих трех параметров друг от друга отдельно для трех рассматриваемых АО, где ход времени (в течение эволюции АО за рассматриваемые интервалы времени, приведенные на рис. 1–3, соответственно) показан градицией от черного к белому и звездочками отмечены времена, ближайшие (в пределах 2 ч) к пикам вспышек М и X классов. Действительно, видно, что точки на графике $E_{potf}(E_{nlfff})$ располагаются вблизи прямой $y = x$ (пунктирная линия), причем вспышки происходили в основном в интервалах, когда $E_{nlfff} > E_{potf}$, т. е. когда свободная энергия $E_{free} > 0$, как и ожидается (см. введение). Однако стоит отметить, что ближе

Таблица 2. Коэффициенты корреляции для всех пар рассматриваемых параметров с ошибками для АО NOAA 11158

Параметр	$max J_z $	$sumJ_z$	$sum J_z $	$sum \Phi_z $	$sum \Phi_h $	E_{potf}	E_{nlfff}	E_{free}
Показатель степени $PDF(j_z)$	0.23 ± 0.22	-0.12 ± 0.22	0.43 ± 0.15	0.46 ± 0.19	0.45 ± 0.19	0.42 ± 0.21	0.42 ± 0.20	-0.23 ± 0.21
$max J_z $		-0.01 ± 0.20	0.63 ± 0.15	0.53 ± 0.18	0.57 ± 0.18	0.47 ± 0.18	0.48 ± 0.17	0.42 ± 0.19
$sumJ_z$			-0.27 ± 0.22	-0.48 ± 0.17	-0.45 ± 0.17	-0.52 ± 0.18	-0.54 ± 0.18	-0.15 ± 0.21
$sum J_z $				0.86 ± 0.07	0.91 ± 0.05	0.79 ± 0.10	0.84 ± 0.09	0.73 ± 0.12
$sum \Phi_z $					0.97 ± 0.02	0.98 ± 0.02	0.99 ± 0.03	0.50 ± 0.18
$sum \Phi_h $						0.93 ± 0.04	0.96 ± 0.02	0.76 ± 0.11
E_{potf}							0.99 ± 0.01	0.76 ± 0.10
E_{nlfff}								0.79 ± 0.09

Таблица 3. Коэффициенты корреляции для всех рассматриваемых пар параметров с ошибками для АО NOAA 11675

Параметр	$\max J_z $	$\text{sum}J_z$	$\text{sum} J_z $	$\text{sum} \Phi_z $	$\text{sum} \Phi_h $	E_{potf}	E_{nfff}	E_{free}
Показатель степени PDF(j_z)	0.68 ± 0.14	-0.07 ± 0.23	0.15 ± 0.18	0.13 ± 0.20	0.38 ± 0.20	0.12 ± 0.22	0.22 ± 0.23	0.16 ± 0.22
$\max J_z $		-0.21 ± 0.21	0.55 ± 0.19	0.53 ± 0.19	0.54 ± 0.19	0.17 ± 0.22	0.39 ± 0.22	0.57 ± 0.17
$\text{sum}J_z$			-0.34 ± 0.21	0.01 ± 0.22	0.32 ± 0.22	0.52 ± 0.19	0.36 ± 0.20	-0.42 ± 0.19
$\text{sum} J_z $				0.46 ± 0.19	0.35 ± 0.21	-0.14 ± 0.23	0.14 ± 0.23	0.81 ± 0.09
$\text{sum} \Phi_z $					0.83 ± 0.09	0.69 ± 0.14	0.83 ± 0.09	-0.06 ± 0.21
$\text{sum} \Phi_h $						0.84 ± 0.09	0.96 ± 0.04	0.17 ± 0.22
E_{potf}							0.94 ± 0.23	-0.05 ± 0.22
E_{nfff}								0.17 ± 0.20

Таблица 4. Коэффициенты корреляции для всех рассматриваемых пар параметров с ошибками для АО NOAA 12673

Параметр	$\max J_z $	$\text{sum}J_z$	$\text{sum} J_z $	$\text{sum} \Phi_z $	$\text{sum} \Phi_h $	E_{potf}	E_{nfff}	E_{free}
Показатель степени PDF(j_z)	0.77 ± 0.11	0.21 ± 0.22	0.72 ± 0.13	0.76 ± 0.11	0.77 ± 0.11	0.74 ± 0.12	0.74 ± 0.12	0.59 ± 0.12
$\max J_z $		0.27 ± 0.21	0.87 ± 0.06	0.92 ± 0.04	0.87 ± 0.06	0.93 ± 0.03	0.93 ± 0.04	0.80 ± 0.07
$\text{sum}J_z$			0.44 ± 0.19	0.35 ± 0.21	0.42 ± 0.20	0.28 ± 0.21	0.33 ± 0.21	0.04 ± 0.17
$\text{sum} J_z $				0.96 ± 0.02	0.98 ± 0.01	0.93 ± 0.04	0.95 ± 0.03	0.87 ± 0.05
$\text{sum} \Phi_z $					0.98 ± 0.01	0.99 ± 0.01	0.99 ± 0.01	0.77 ± 0.08
$\text{sum} \Phi_h $						0.96 ± 0.02	0.97 ± 0.02	0.87 ± 0.05
E_{potf}							0.99 ± 0.01	0.71 ± 0.10
E_{nfff}								0.78 ± 0.07

к концу рассматриваемых интервалов времени для АО 11158 и 11675 наблюдалась обратная ситуация, когда $E_{\text{nfff}} < E_{\text{potf}}$. По всей видимости, это связано, во-первых, с неточностью магнитной экстраполяции в декартовых координатах при приближении АО к западному краю солнечного диска, а во-вторых, в это время было относительное превышение потока вертикальной компоненты магнитного

поля над потоком горизонтальной компоненты (см. третьи сверху панели на рис. 1 и рис. 2), первая из которых определяет потенциальное магнитное поле, а последняя — продольные токи и бессильное поле. Вероятно, относительная слабость горизонтальных магнитных полей в это время сказывается на качестве бессильной экстраполяции. Интересно отметить, что для АО 12673, в которой были

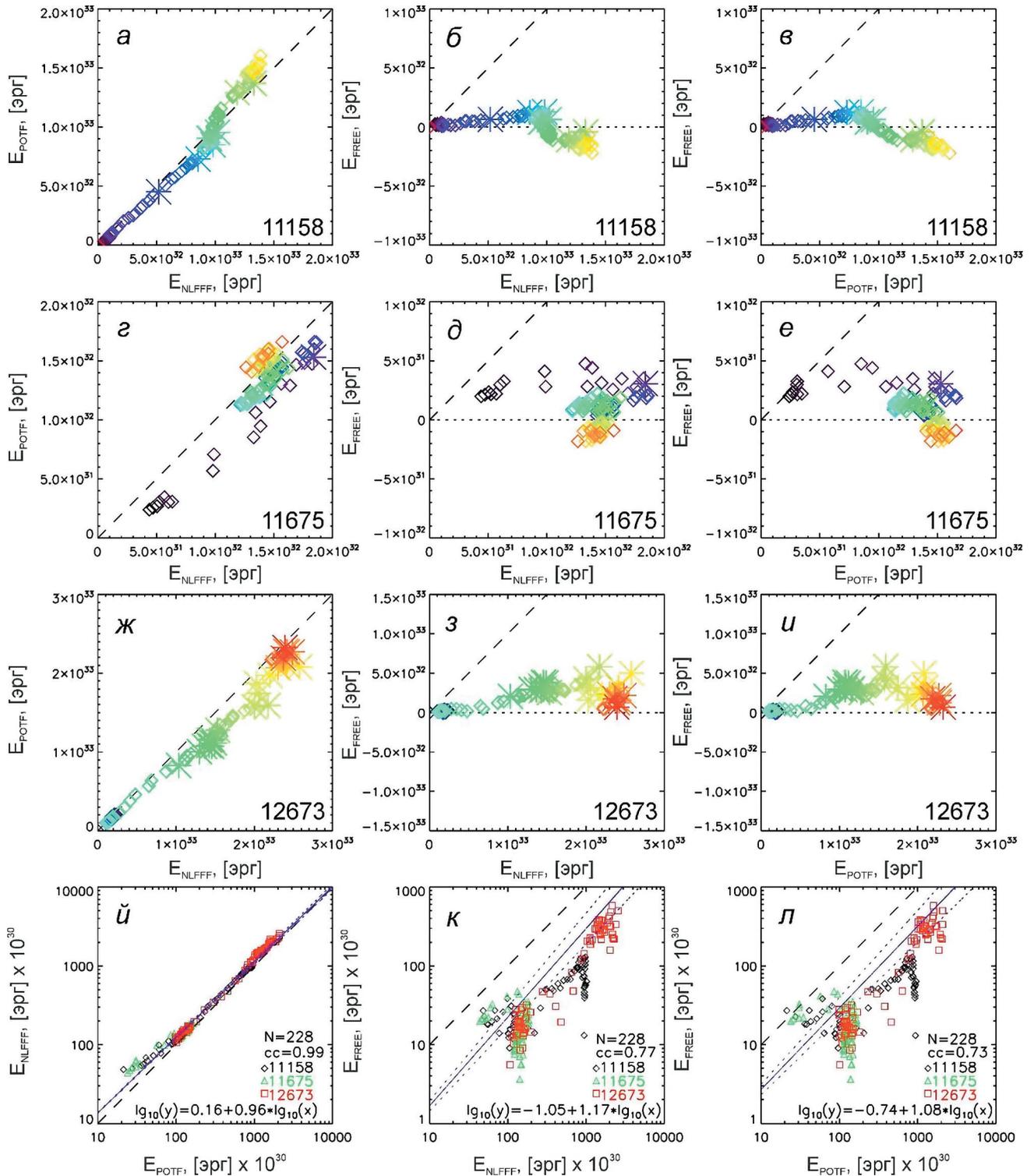


Рис. 7. Графики парных зависимостей энергии нелинейного бессевого магнитного поля E_{nlfff} , энергии потенциального магнитного поля E_{potf} и свободной магнитной энергии E_{free} друг от друга для последовательных моментов времени в АО 11158 (а–в), 11675 (г–е) и 12673 (ж–и). На (й–л) показаны аналогичные парные зависимости, но для совокупности данных в АО 11158 (ромбы), 11675 (треугольники) и 12673 (квадраты).

самые сильные магнитные поля, этой проблемы не возникло даже при больших гелиодолготах. Не удивительно, что E_{free} хуже коррелирует с E_{nlfff} и E_{potf} чем они между собой, поскольку E_{free} является разностью этих двух больших сопоставимых чисел (формула (7)), коими являются E_{nlfff} и E_{potf} (отметим, что соответствующие cc посчитаны для точек $E_{free} > 0$).

Факт высокой корреляции E_{nlfff} и E_{potf} представляется полезным. Он позволяет делать оценку полной энергии нелинейного бессилового магнитного поля в АО на основе более просто вычисляемой энергии магнитного поля в потенциальном приближении, требующей информации только о вертикальной (или продольной лучу зрения вблизи центра диска) компоненты фотосферного поля (напомним, что для экстраполяции в нелинейном бессиловом приближении необходима информация о трех компонентах вектора поля). На рис. 7й–л показаны парные зависимости (в лог-лог масштабе) $E_{nlfff}(E_{potf})$, $E_{free}(E_{nlfff})$ и $E_{free}(E_{potf})$ для совокупности $N = 228$ моментов времени совместно для АО 11158 (ромбы), 11675 (треугольники) и 12673 (квадраты), когда их центры находились в диапазоне гелиографических долгот $[-45^\circ, +45^\circ]$ (для минимизации ошибок определения компонент поля), причем $E_{free} > 0$. Можно отметить почти линейную зависимость $E_{nlfff}(E_{potf})$ в лог-лог масштабе (за исключение области низких энергий $< 10^{32}$ эрг) и более сильный разброс для пар $E_{free}(E_{nlfff})$

и $E_{free}(E_{potf})$. Коэффициенты корреляции для этих пар имеют значения 0.99, 0.77 и 0.73, соответственно. Линейная регрессия для значений десятичных логарифмов пар параметров дает следующие зависимости:

$$\left(\frac{E_{nlfff}}{10^{30} \text{ эрг}} \right) = 10^{0.16} \left(\frac{E_{potf}}{10^{30} \text{ эрг}} \right)^{0.96 \pm 0.01} \quad (8)$$

$$\left(\frac{E_{free}}{10^{30} \text{ эрг}} \right) = 10^{-1.05} \left(\frac{E_{nlfff}}{10^{30} \text{ эрг}} \right)^{1.17 \pm 0.07} \quad (9)$$

$$\left(\frac{E_{free}}{10^{30} \text{ эрг}} \right) = 10^{-0.74} \left(\frac{E_{potf}}{10^{30} \text{ эрг}} \right)^{1.08 \pm 0.07} \quad (10)$$

Линейная регрессия для десятичных логарифмов значений показана на рис. 7й–л сплошной линией и ± 1 стандартное отклонение от нее — точечными линиями, для сравнения пунктирной линией показана зависимость $y = x$. Получившаяся зависимость (8) несколько отличается от зависимости $E_{nlfff}(E_{potf})$ с показателем степени 1.26, полученной [Aschwanden2020] на другой выборке АО и на основе другого метода магнитной экстраполяции. В той работе рассматривались 172 вспышки М и X класса, произошедшие в разных АО в интервале гелиодолгот $[-45^\circ, +45^\circ]$ с 1 июня 2010 г. по 31 декабря 2014 г.

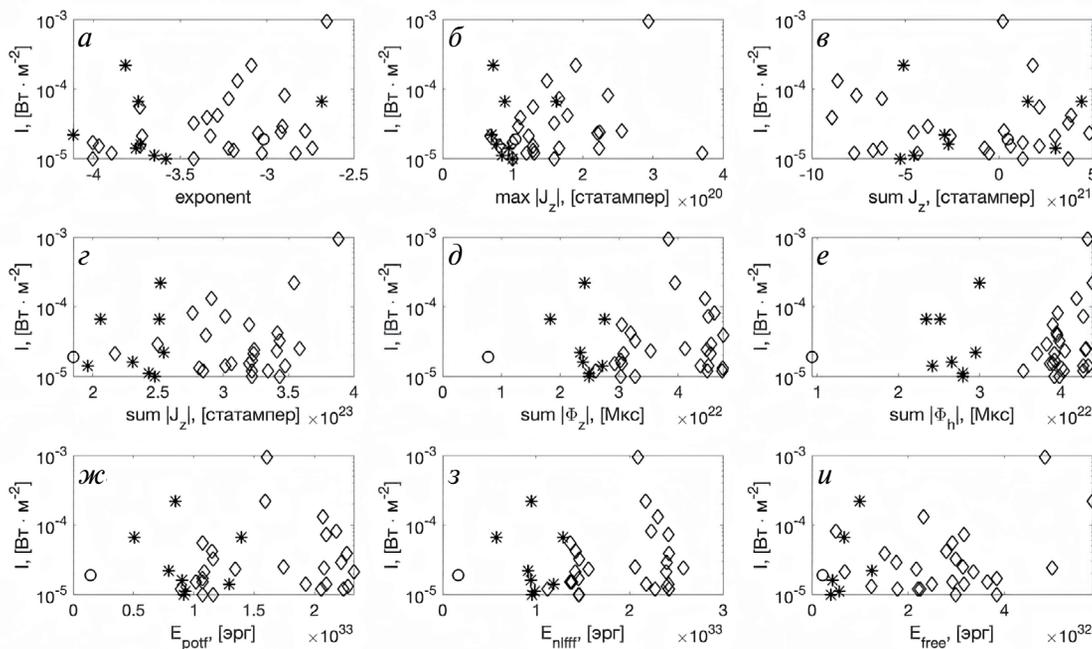


Рис. 8. Графики парных зависимостей пиковой плотности потока рентгеновского излучения вспышек в канале 1–8 Å GOES/XRS (т. е. рентгеновского класса) от рассматриваемых параметров, посчитанных для моментов времени в пределах 2 ч до вспышек. Звездочки соответствуют вспышкам в АО 11158, кружок — АО 11675, ромбы — АО 12673.

3.4. Корреляция между анализируемыми параметрами и рентгеновским классом вспышек

На рис. 8 показаны графики парных зависимостей пиковой плотности потока вспышек в канале 1—8 Å GOES/XRS (т. е. рентгеновского класса вспышки) от девяти рассматриваемых параметров, посчитанных для моментов времени перед (в пределах 2 ч) вспышками классов М и Х совокупно в трех АО 11158 (звездочки), 11675 (кружок) и 12673 (ромбы). Видно, что ни на одном из графиков нет четких трендов, точки разбросаны довольно хаотично. Для всех пар параметров линейные коэффициенты корреляции не превышают 0.35 (табл. 5).

Этот отрицательный результат несколько неожиданный. Возможно, он связан с малым количеством вспышек в рассмотренной выборке (35 штук). С другой стороны, это может быть следствием того, что вспышки представляют собой локальные события энерговыделения, охватывающие только часть площади АО, тогда как рассматриваемые

параметры являются интегральными характеристиками токов и магнитных полей во всей АО.

3.5. Значения параметров перед мощными вспышками

Представляется полезным определить характерные значения исследуемых параметров перед началом мощных вспышек. В случае не очень сильного разброса какого-либо параметра относительно среднего, факт достижения им характерного значения может использоваться в качестве индикатора приближения мощной вспышки или серии мощных вспышек в АО [Ишков, 1998; 2023].

В табл. 6 приведены средние (средн.) с разбросом и минимальные (миним.) значения этих параметров для совокупности всех вспышек классов М и Х (в пределах 2 ч до их начала), произошедших в каждой из трех рассматриваемых АО. Для АО 11675 средние и минимальные значения совпадают и не указан разброс, поскольку в этой АО была только одна вспышка класса М.

Таблица 5. Коэффициенты линейной корреляции между рентгеновским классом вспышки и рассматриваемыми параметрами непосредственно перед вспышкой в совокупности для трех АО 11158, 11675 и 12673

Параметр	Показатель степени PDF(j_z)	$max J_z $	$sum J_z$	$sum J_z $	$sum \Phi_z $	$sum \Phi_h $	E_{potf}	E_{niff}	E_{free}
Класс вспышки	0.29 ±0.34	0.35 ±0.33	0.03 ±0.34	0.31 ±0.34	0.07 ±0.34	0.16 ±0.34	0.05 ±0.33	0.13 ±0.31	0.34 ±0.34

Таблица 6. Средние и минимальные значения рассматриваемых параметров для трех АО приблизительно за 2 ч до каждой из вспышек

	NOAA 11158	NOAA 11675	NOAA 12673
Показатель степени PDF(j_z)	средн. —3.63±0.42 миним. —4.12	средн. —3.02 миним. —3.02	средн. —3.29±0.41 миним. —4.01
$max J_z \cdot 10^{19}$, [статампер]	средн. 9.37±2.97 миним. 7.03	средн. 10.46 миним. 10.46	средн. 16.63±7.02 миним. 6.82
$sum J_z \cdot 10^{21}$, [статампер]	средн. —1.44± 3.86 миним. —5.26	средн. 0.49 миним. 0.49	средн. —1.53±4.42 миним. —8.93
$sum J_z \cdot 10^{23}$, [статампер]	средн. 2.35±0.22 миним. 1.96	средн. 1.85 миним. 1.85	средн. 3.15±0.36 миним. 2.16
$sum \Phi_z \cdot 10^{22}$, [Мкс]	средн. 2.43±0.29 миним. 1.83	средн. 0.77 миним. 0.77	средн. 3.88±0.73 миним. 2.61
$sum \Phi_h \cdot 10^{22}$, [Мкс]	средн. 2.68±0.28 миним. 2.34	средн. 0.93 миним. 0.93	средн. 4.04±0.22 миним. 3.54
$E_{potf} \cdot 10^{32}$, [эрг]	средн. 9.49±2.79 миним. 5.08	средн. 1.47 миним. 1.47	средн. 16.49±5.16 миним. 8.95
$E_{niff} \cdot 10^{32}$, [эрг]	средн. 9.77±2.10 миним. 5.76	средн. 1.69 миним. 1.69	средн. 19.32±4.76 миним. 11.21
$E_{free} \cdot 10^{32}$, [эрг]	средн. 0.72±0.36 миним. 0.39	средн. 0.22 миним. 0.22	средн. 2.82±1.25 миним. 0.51

Таблица 7. Оценки скоростей возрастания рассматриваемых параметров на этапе быстрого всплытия магнитного потока в АО до первой мощной (M-, X-класса) вспышки

	NOAA 11158	NOAA 11675	NOAA 12673
$\langle d(\max J_z)/dt \rangle$, [стат/мнер/с]	$7.29 \cdot 10^{14}$	$9.91 \cdot 10^{14}$	$6.21 \cdot 10^{14}$
$\langle d(\sum J_z)/dt \rangle$, [стат/мнер/с]	$(7.81 \pm 1.40) \cdot 10^{17}$	—	$(1.02 \pm 0.24) \cdot 10^{18}$
$\langle d(\sum \Phi_z)/dt \rangle$, [Мкс/с]	$(0.98 \pm 0.18) \cdot 10^{17}$	$(3.80 \pm 2.46) \cdot 10^{16}$	$(1.43 \pm 0.32) \cdot 10^{17}$
$\langle d(\sum \Phi_h)/dt \rangle$, [Мкс/с]	$(1.32 \pm 0.36) \cdot 10^{17}$	$(4.44 \pm 3.96) \cdot 10^{16}$	$(2.11 \pm 0.38) \cdot 10^{17}$
$\langle d(\sum \Phi)/dt \rangle$, [Мкс/с]	$(1.64 \pm 0.31) \cdot 10^{17}$	$(5.84 \pm 3.41) \cdot 10^{16}$	$(2.54 \pm 0.36) \cdot 10^{17}$
$\langle d(E_{\text{pot}})/dt \rangle$, [эрг/с]	$1.86 \cdot 10^{27}$	$9.48 \cdot 10^{26}$	$8.12 \cdot 10^{27}$
$\langle d(E_{\text{diff}})/dt \rangle$, [эрг/с]	$2.02 \cdot 10^{27}$	$1.02 \cdot 10^{27}$	$1.05 \cdot 10^{28}$

Дополнительно были оценены средние скорости ($\langle d/dt \rangle$) возрастания параметров на фазе быстрого выхода нового магнитного потока в АО (до первой мощной вспышки), в том числе суммарного магнитного потока, $|\Phi| = \sqrt{|\Phi_z|^2 + |\Phi_h|^2}$ для сравнения со значениями, приведенными в работе [Ишков, 1998; 2023]. Результаты этих расчетов приведены в табл. 7.

Оценить скорость возрастания суммарного беззнакового вертикального тока $\sum|J_z|$ в АО 11675 не удалось из-за хаотичности соответствующих кривых на фазе быстрого всплытия магнитного потока в этой АО (см. рис. 2). Ошибки для скорости изменения максимума модуля вертикального тока $\max|J_z|$ не приведены ввиду их малости. Для АО 11158 и 12673 с высокой вспыхечной активностью оценки почти совпадают, для АО 11675 оценки близки, если рассматривать верхние пределы значений магнитных потоков. Оба критерия В. Н. Ишкова (магнитный поток выше 10^{21} Мкс и скорость роста магнитного потока выше 10^{17} Мкс/с в АО) для осуществления серии мощных вспышек выполнены для АО 11158 и 12673. Однако для АО 11675 значение скорости роста магнитного потока немного ниже критического и тем самым может объясняться ее относительно более слабой вспыхечной активностью (всего одна вспышка класса M и ни одной вспышки класса X). Хотя интересно отметить, что максимальный ток (или плотность тока) в этой АО был(а) выше, чем в АО 11158, а наклон степенного хвоста $PDF(|j_z|)$ был наиболее пологим среди трех рассмотренных АО, при наименьших полном беззнаковом вертикальном токе, беззнаковых магнитных потоках и магнитных энергиях. Последнее соответствует выводу [Zimovets et al., 2020b] о том, что не прослеживается прямой связи между наклоном спектра $PDF(|j_z|)$ и вспыхечной активностью в АО.

3.6. К вопросу о прогнозировании мощных вспышек

В работе [Aschwanden, 2020] на основе статистического анализа 172 мощных вспышек классов M и X получена зависимость между энергией потенциального магнитного поля АО и рентгеновским (в канале GOES1—8 Å классом вспышки в этой АО:

$$F_8 \approx 2.05 \times 10^{-7} \left(\frac{E_{\text{pot}}}{10^{30} \text{ эрг}} \right)^{0.92} \left[\text{Вт} / \text{м}^2 \right] \quad (11)$$

Применимость этой формулы протестирована в [Aschwanden, 2020] только для февраля месяца 2011 г., что включает формирование и прохождение одной из исследуемых нами АО (11158) по солнечному диску. Было показано, что выражение (11) в целом адекватно определяет максимальный балл вспышки, которая может произойти в АО. На основе сделанных выше вычислений энергии потенциального магнитного поля $E_{\text{pot}}(t)$ протестируем применимость выражения (11) и точность прогноза для выборки из 11 вспышек классов M и X в трех рассматриваемых нами АО. Мы рассматриваем только самые мощные вспышки, произошедшие в АО за каждые сутки, поэтому здесь их число меньше, чем в табл. 1.

На рис. 9 пунктирной линией показана вычисленная на основе выражения (11) пиковая плотность потока $F_8(t)$ вероятной вспышки в канале GOES1—8 Å для АО 11158 (а), 11675 (б) и 12673 (в) для рассматриваемых интервалов времени с шагом 2 ч. Звездочками отмечены пиковые плотности потока (классы M и X, события более низких классов не рассматриваются) за каждые сутки, произошедших в этих АО. Можно видеть, что в целом наблюдаемые пиковые плотности потока лежат вблизи вычисленных кривых с некоторым разбросом. Отношения наблюдаемых и вычисленных пиковых

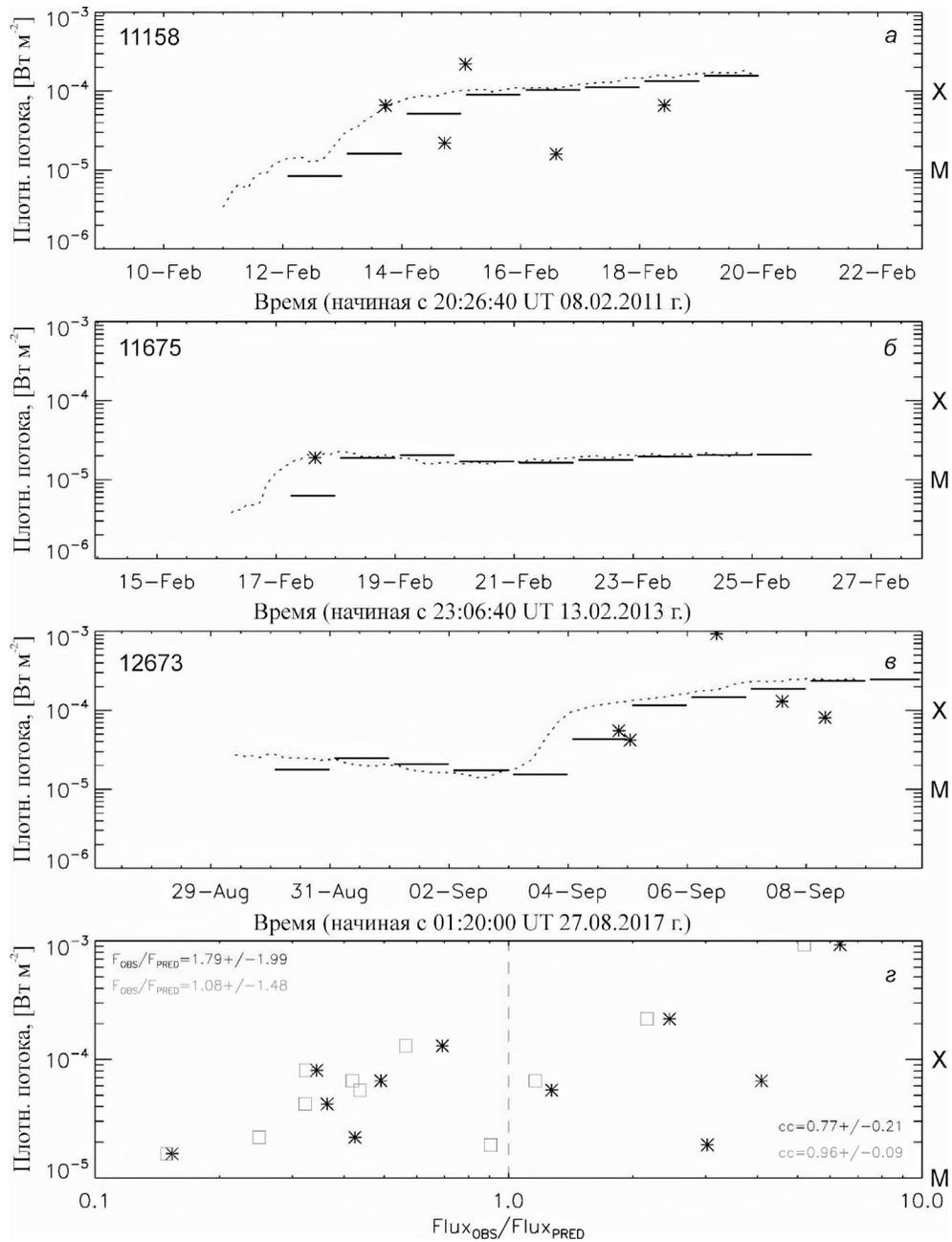


Рис. 9. Наблюдаемые и прогнозируемые пиковые плотности потока рентгеновского излучения в канале 1–8 Å GOES/XRS (т. е. рентгеновские классы) самых мощных солнечных вспышек в АО 11158 (а), 11675 (б), 12673 (в) и зависимость их отношения от класса максимальной вспышки (з).

плотностей потока, F_{obs}/F_{pred} , показано на рис. 9з серыми квадратами. Значения отношений F_{obs}/F_{pred} находятся в пределах от 0.15 до 5.2, т. е. в пределах одного порядка величины в обе стороны относительно единицы. Среднее значение 1.08, стандартное отклонение 1.48. Интересно отметить высокий коэффициент корреляции 0.96 ± 0.09 между наблюдаемой пиковой плотностью потока вспышки F_{obs} и отношением плотностей потока F_{obs}/F_{pred} , другими словами, чем выше регистрируемый максимальный

класс вспышки, тем более заниженным получается класс вспышки из расчета.

Теперь проверим точность прогнозирования с помощью выражения (11) максимального класса вспышки на ближайшие сутки (24 ч) вперед. Для этого мы вычислили средние значения возможной максимальной плотности потока рентгеновского излучения в канале GOES 1–8 Å по данным о энергии потенциального поля в АО за предыдущие

сутки. Эти значения показаны жирными черными горизонтальными отрезками для каждых рассматриваемых суток на рис. 9а–в. Полученные значения отношения наблюдаемых и прогнозируемых плотностей потока F_{obs}/F_{pred} для этой ситуации показаны черными звездочками на рис. 9г. Видно, что расположение этих значений немного отличается от значений отношения F_{obs}/F_{pred} , полученных по данным о магнитной энергии приблизительно за 2 ч до начала вспышек, обозначенных серыми квадратами. В этом случае среднее отношение и стандартное отклонение имеют более высокие значения 1.79 и 1.99, соответственно, а коэффициент корреляции более низкое значение 0.77 ± 0.21 но все равно превышает 0.5, указывая на наличие корреляции. Минимальное и максимальное значения отношения F_{obs}/F_{pred} в этом случае составляют 0.16 и 6.3, соответственно, что близко к рассмотренному выше случаю и опять же в пределах порядка величины относительно единицы в обе стороны.

Тест Колмогорова—Смирнова для двух выборок точек (звездочек и квадратов на рис. 9г) указывает на то, что с большой вероятностью они принадлежат к одному множеству, т. е. статистически идентичны. Это может предварительно указывать на то, что нет принципиальной разницы в точности прогнозирования максимального балла вспышки (на основе этого подхода) по усредненным данным об энергии потенциального магнитного поля за предыдущие сутки или по данным за ближайšie 2 ч.

Таким образом, на ограниченной выборке АО и вспышек мы приходим к предварительному выводу о том, что рассмотренный подход, основанный на выражении (11) из [Aschwanden, 2020] позволяет прогнозировать максимальный возможный рентгеновский класс мощной вспышки на 24 ч вперед с точностью в пределах порядка величины, причем прослеживается тенденция недооценивать класс наиболее мощных вспышек. К примеру, для самой мощной вспышки 24 цикла SOL2017-09-06T11:53 X9.3 класса в АО 12673 недооценка составляет ≈ 3 раза, а для известной вспышки класса X2.2 SOL2011-02-15T01:44 в АО 11158 недооценка ≈ 5 раза.

Представляется полезным в дальнейшем провести более систематический тест этого довольно перспективного подхода на значительно большей выборке АО и вспышек и подобрать оптимальный интервал времени прогнозирования. Одно из преимуществ этого подхода — это относительная простота вычислений магнитной энергии потенциального поля в АО, требующая знания только вертикальной (или продольной лучу зрения) компоненты вектора магнитного поля на фотосфере, в отличие от нелинейного бессилового приближения, требующего информации о векторе поля.

Один из недостатков — сложность магнитной экстраполяции для АО, располагающихся вблизи лимба, где точность определения магнитного поля на фотосфере сильно снижается. Как вариант, можно попробовать обойти эту проблему на основе использования не локальной экстраполяции для АО, а глобальной экстраполяции в сферическом слое, в частности с помощью модели потенциального поля с поверхностью источников — PFSS (например, [Schatten et al., 1969; Schrijver and DeRosa, 2003]). Этот вопрос требует отдельной проработки. Другой недостаток — невозможность с помощью этого подхода оценивать вероятность наступления мощной вспышки в заданном наперед интервале времени. Из рис. 9а–в можно видеть, что были сутки, в которых в АО вообще не происходило мощных вспышек классов М и X, тогда как рассчитанные пиковые рентгеновские потоки возможной вспышки были на уровне классов М и даже X (например, 17 февраля 2011 г.). Для оценки вероятности мощных вспышек в рамках данного подхода необходимо провести систематический статистический анализ на большой выборке событий. Или же следует дополнить данный прогноз другим прогнозом, позволяющим оценивать вероятность вспышки определенного класса (например, [Song et al., 2009; Bloomfield et al., 2012; Nishizuka et al., 2018]).

4. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В результате исследования эволюционного поведения ряда параметров магнитного поля и вертикального электрического тока в трех АО 11158, 11675 и 12673, начиная с момента их формирования и до приближения к западному лимбу, рассчитанных на основе фотосферных магнитограмм SDO/HMI установлено несколько закономерностей:

в период от зарождения АО до момента начала образования вспышек классов М и X наблюдается (в течение ≈ 2 сут) быстрое всплывание магнитного потока (со скоростью выше $5 \cdot 10^{16}$ Мкс/с), сопровождаемое значительным ростом отдельных островов надфоновых токов ($|j_z| > 9 \cdot 10^3$ статампер/см²) и формирование их в более крупные, объединяющиеся структуры. Образование таких структур происходит вблизи сильных вертикальных магнитных полей ($B_z > 10^3$ Гс), в основном, вблизи линии инверсии магнитной полярности. В то же время значительно снижается количество участков с фоновыми токами ($|j_z| < 9 \cdot 10^3$ статампер/см²). При этом наклон степенного “хвоста” $PDF(|j_z|)$ становится более пологим, степенной показатель возрастает от значения примерно -8 и принимает квазистабильное положение во время фазы мощных вспышек в диапазоне

значений от -5 до -3 . Интересно также отметить, что в АО 12673 степенной показатель $PDF(|j_z|)$ вышел на квазипостоянный уровень -4 ± 0.3 еще до начала значительного быстрого всплытия магнитного потока;

- развитие вспышек высоких рентгеновских классов происходит после быстрого всплытия новых магнитных потоков со скоростью выше 5×10^{16} Мкс/с, когда суммарные беззнаковые магнитные потоки $\sum|\Phi_z|$ и $\sum|\Phi_h|$ АО достигли значений $>7 \times 10^{21}$ Мкс (т. е. примерно выполнялись оба критерия Ишкова [1998; 2023]). Беззнаковый суммарный вертикальный электрический ток во время фазы развития мощных вспышек составлял от 1.8×10^{23} до 4×10^{23} статампер. Энергия магнитного поля в АО, экстраполированного в потенциальном и нелинейном бессиловом приближении, была в диапазоне значений от 0.151×10^{33} (для более слабой АО 11675) до 20×10^{33} эрг (для АО 12673 с сильной вспышечной активностью), а свободная магнитная энергия от 0.2×10^{32} до 2.8×10^{32} эрг. В среднем отношение свободной магнитной энергии к энергии нелинейного бессилового поля составляло $0.07-0.15$;
- среди рассмотренных пар характеристик коэффициенты корреляции самые большие для энергий потенциального и нелинейного бессилового магнитных полей — от 0.94 (в АО 11675) до 0.99 (в АО 11158 и 12673). Получено регрессионное соотношение между этими типами магнитной энергии. При этом свободная магнитная энергия коррелирует хуже с энергиями потенциального и нелинейного бессилового поля для мощных АО 11158 и 12673 и не коррелирует с ними для более слабой АО 11675;
- не обнаружено значимых корреляций между рентгеновскими классами мощных вспышек в АО и рассмотренными характеристиками магнитного поля и вертикального тока. Возможно, этот отрицательный результат обусловлен как малой выборкой вспышек (35 штук) для трех АО, так и интегральным характером рассмотренных параметров, тогда как вспышки представляют собой локальные процессы энерговыделения в АО, занимающие лишь часть их площади/объема;
- дополнительно, выполнено тестирование идеи М. Ашвандена для прогнозирования максимально возможного рентгеновского класса мощной вспышки в АО в заданном наперед интервале времени (24 ч) на основе статистического соотношения между энергией потенциального магнитного поля и классом вспышки, полученным в работе [Aschwanden, 2020]. Показано, что среднее отношение измеряемого и прогнозируемого максимальных классов вспышек за сутки в АО примерно 1.8 при

стандартном отклонении около 2 . Этот подход для прогнозирования максимально возможного класса солнечной вспышки представляется перспективным и требует дальнейшего систематического исследования на большой выборке АО и вспышек. Однако, этот подход, как и практически все остальные, не позволяет прогнозировать точное время и количественные характеристики отдельных вспышек, которые могут происходить сериями в АО в результате всплытия нового магнитного потока и его взаимодействия со старым [Ишков, 2023].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи благодарят команду инструмента SDO/HMI и NASA за предоставленный открытый доступ к данным. Также авторы признательны за МААТ: *MATLAB Astronomy and Astrophysics Toolbox* [Ofek, 2014], который использовался при обработке данных для этой статьи. Благодарим рецензентов за предложенные исправления.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств государственной субсидии научных исследований в рамках темы “ПЛАЗМА”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зверева А. М., Северный А. Б. Магнитные поля и протонные вспышки — 7 июля и 2 сентября 1966 г. // Изв. Крымской астрофиз. обс. 1970. Т. 41—42. С. 97—157.
- Зимовец И. В., Нечаева А. Б., Шарыкин И. Н., Низамов Б. А. Источники длиннопериодных рентгеновских пульсаций перед началом солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 4. С. 436—455. <https://doi.org/10.31857/S0016794022040186>
- Ишков В. Н. Всплывающие магнитные потоки — ключ к прогнозу больших солнечных вспышек // Изв. РАН. Сер. физическая. 1998. Т. 62. № 9. С. 1835—1839.
- Ишков В. Н. Прогноз солнечных вспышечных явлений: солнечные протонные события // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 7. С. 1010—1013. <https://doi.org/10.31857/S0367676523701788>
- Прист Э. Р. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 1985. 592 с.
- Северный А. Б. Некоторые проблемы физики Солнца. М.: Наука, 1988. 224 с.
- Степанов А. В., Зайцев В. В. Магнитосферы активных областей Солнца и звезд. М.: Физматлит, 2019. 392 с.
- Anfinogentov S. A., Stupishin A. G., Mysh'yakov I. I., Fleishman G. D. Record-breaking Coronal Magnetic Field in

- Solar Active Region 12673 // *Astrophys. J. Lett.* 2019. V. 880: L29. 5 p.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab3042>
- Artemyev A., Zimovets I.V., Sharykin I.N., et al.* Comparative Study of Electric Currents and Energetic Particle Fluxes in a Solar Flare and Earth Magnetospheric Substorm // *Astrophys. J.* 2021. V. 923. № 2.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2dfc>
- Aschwanden M.J.* Global Energetics of Solar Flares. XI. Flare Magnitude Predictions of the GOES Class // *Astrophys. J.* 2020. V. 897. № 16. 11 p.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9630>
- Barczynski K., Aulanier G., Janvier M., Schmieder B., Masson S.* Electric Current Evolution at the Footpoints of Solar Eruptions // *Astrophysical Journal.* 2020. V. 895. № 1. 21 p.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab893d>
- Barnes G., Leka K.D.* Inferring Currents from the Zeeman Effect at the Solar Surface // *Electric Currents in Geospace and Beyond.* Ed. A. Keiling, O. Marghitsu & M. Wheatland. ISBN: 9781119324492. American Geophysical Union. 2018. P. 81—91.
<https://doi.org/10.1002/9781119324522.ch5>
- Bloomfield D.S., Higgins P.A., McAteer R.T.J., Gallagher P.T.* Toward Reliable Benchmarking of Solar Flare Forecasting Methods // *Astrophys. J. Lett.* 2012. V. 747. № 2. Article ID L41. 7 p.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/747/2/L41>
- Bobra M.G., Couvidat S.* Solar flare prediction using SDO/HMI vector magnetic field data with a machine-learning algorithm // *Astrophys. J.* 2015. V. 798.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/2/135>
- Bobra M.G., Sun X., Hoeksema J.T., Turmon M., Liu Y., Hayashi K., Leka K.D.* The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Vector Magnetic Field Pipeline: SHARPS — Space-Weather HMI Active Region Patches // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 3549—3578.
<https://doi.org/10.1007/s11207-014-0529-3>
- Fleishman G.D., Pevtsov A.A.* Electric Currents in the Solar Atmosphere // *Electric Currents in Geospace and Beyond.* Edited by Andreas Keiling, Octav Marghitsu and Michael Wheatland. ISBN: 9781119324492. American Geophysical Union. 2018. P. 43—65.
<https://doi.org/10.1002/9781119324522.ch3>
- Fursyak Yu.A., Abramenko V.I.* Possibilities for estimating horizontal electrical currents in active regions on the Sun // *Astrophys.* 2017. V. 60. № 4. P. 544—552.
<https://doi.org/10.1007/s10511-017-9505-6>
- Fursyak Yu.A., Abramenko V.I., Zhukova A.V.* Parameters of Electric Currents in Active Regions with Different Levels of Flare Productivity and Different Magnetomorphological Types // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2021. V. 61. № 8. P. 1197—1206.
<https://doi.org/10.1134/S0016793221080089>
- Grigoryev V.M., Ermakova L.V.* A Study of the Distribution of Electric Currents and Current Helicity in the Photosphere at the Growth Stage of a Bipolar Active Region // *Solar Phys.* 2002. V. 207. P. 309—321.
<https://doi.org/10.1023/A:1016207115843>
- Hoeksema J.T., Liu Y., Hayashi K., et al.* The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Vector Magnetic Field Pipeline: Overview and Performance // *Sol. Phys.* 2014. V. 289. P. 3483—3530.
<https://doi.org/10.1007/s11207-014-0516-8>
- Janvier M., Aulanier G., Bommier V., Schmieder B., Demoulin P., Pariat E.* Electric Currents in Flare Ribbons: Observations and Three-dimensional Standard Model // *Astrophys. J.* 2014. V. 788. № 1.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/788/1/60>
- Jiang C., Zou P., Feng X., et al.* Magnetohydrodynamic Simulation of the X9.3 Flare on 2017 September 6: Evolving Magnetic Topology // *Astrophys. J.* 2018. V. 869. № 13. 18 p.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaeacc>
- Linton M.G., Antiochos S.K., Barnes G., et al.* Recent progress on understanding coronal mass ejection/flare onset by a NASA living with a star focused science team // *Adv. Space Res.* 2023 (in press).
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.06.045>
- Lysenko A.L., Anfinogentov S.A., Svinikin D.S., Frederiks D.D., Fleishman G.D.* Gamma-Ray Emission from the Impulsive Phase of the 2017 September 6 X9.3 Flare // *Astrophys. J.* 2019. V. 877. № 145. 13 p.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1be0>
- Musset S., Vilmer N., Bommier V.* Hard X-ray emitting energetic electrons and photospheric electric currents // *A&A.* 2015. V. 580.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424378>
- Nechaeva A.B., Sharykin I.N., Zimovets I.V., Chen F.* Relationship between the Horizontal Gradient of the Vertical Magnetic Field and the Horizontal Electric Current on the Photosphere in a Model Active Region of the Sun // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2021. V. 61. № 7. P. 956—963.
<https://doi.org/10.1134/S0016793221070148>
- Nechaeva A.B., Zimovets I.V., Sharykin I.N.* Comparison between probability density functions of vertical electric current in solar active regions based on HMI/SDO and SOT/Hinode data // *Solar-Terrestrial Physics.* 2022. V. 8. P. 63—68.
<https://doi.org/10.12737/stp-83202210>
- Nita G.M., Fleishman G.D., Kuznetsov A.A., Anfinogentov S.A., Stupishin A.G., Kontar E.P., Schonfeld S.J., Klimchuk J.A., Gary D.E.* Data-constrained Solar Modeling with GX Simulator // *Astrophys. J. Supplement Series.* 2023. V. 267. № 6. (24 p).
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/acd343>
- Ofeq Eran O.* MAAT: MATLAB Astronomy and Astrophysics Toolbox // *Astrophysics Source Code Library.* 2014. Record ASCL: 1407.005.
- Priest E.R., Forbes T.G.* The magnetic nature of solar flares // *The Astronomy and Astrophysics Review.* 2002. V. 10. № 4. P. 313—377.
<https://doi.org/10.1007/s001590100013>

- Puschmann K.G., Ruiz Cobo B., Martínez Pillet V.* The electrical current density vector in the inner penumbra of a sunspot // *Astrophys. J. Lett.* 2010. V. 721. № 1. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/721/1/L58>
- Schatten K.H., Wilcox J.M., Ness N.F.* A model of interplanetary and coronal magnetic fields // *Solar Physics.* 1969. V. 6. № 3. P. 442—455. <https://doi.org/10.1007/BF00146478>
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al.* The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Sol. Phys.* 2012. V. 275. P. 207—227. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2>
- Schmieder B., Aulanier G.* Solar Active Region Electric Currents Before and During Eruptive Flares // *Electric Currents in Geospace and Beyond.* Ed. A. Keiling, O. Marghitu & M. Wheatland. ISBN: 9781119324492. American Geophysical Union. 2018. P. 391—406. <https://doi.org/10.1002/9781119324522.ch23>
- Schrijver C.J., DeRosa M.L.* Photospheric and heliospheric magnetic fields // *Solar Physics.* 2003. V. 212. № 1. P. 165—200. <https://doi.org/10.1023/A:1022908504100>
- Schrijver C.J., Aulanier G., Title A.M., Pariat E., Delannée C.* The 2011 February 15 X2 Flare, Ribbons, Coronal Front, and Mass Ejection: Interpreting the Three-dimensional Views from the Solar Dynamics Observatory and STEREO Guided by Magnetohydrodynamic Flux-Rope Modeling // *Astrophys. J.* 2011. V. 738. 23 p. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/738/2/167>
- Sharykin I.N., Kosovichev A.G., Zimovets I.V.* Energy Release and Initiation of a Sunquake in a C-Class Flare // *Astrophys. J.* 2015. V. 807. № 1. P. 102. 9 p. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/807/1/102>
- Sharykin I.N., Kosovichev A.G.* Onset of Photospheric Impacts and Helioseismic Waves in X9.3 Solar Flare of 2017 September 6 // *The Astrophysical Journal.* 2018. V. 864. № 1. Article ID86. 13 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad558>
- Sharykin I.N., Zimovets I.V., Myshyakov I.I.* Flare Energy Release at the Magnetic Field Polarity Inversion Line during the M1.2 Solar Flare of 2015 March 15. II. Investigation of Photospheric Electric Current and Magnetic Field Variations Using HMI 135 s Vector Magnetograms // *Astrophys. J.* 2020. V. 893. № 2. P. 159. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab84ef>
- Song H., Tan C., Jing J., Wang H., Yurchyshyn V., Abramenko V.* Statistical Assessment of Photospheric Magnetic Features in Imminent Solar Flare Predictions // *Solar Physics.* 2009. V. 254. № 1. P. 101—125. <https://doi.org/10.1007/s11207-008-9288-3>
- Sun X., Hoeksema J.T., Liu Y., et al.* Evolution of Magnetic Field and Energy in a Major Eruptive Active Region Based on SDO/HMI Observation // *Astrophys. J.* 2012. V. 748. № 77. P. 15. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/748/2/77>
- Tadesse T., Pevtsov A.A., Wiegelmann T., MacNeise P.J., Gosain S.* Global Solar Free Magnetic Energy and Electric Current Density Distribution of Carrington Rotation 2124 // *Solar Physics.* 2014. V. 289. № 11. P. 4031—4045. <https://doi.org/10.1007/s11207-014-0581-z>
- Tan B., Ji H., Huang G., Zhou T., Song Q., Huang Y.* Evolution of Electric Currents Associated with Two M-Class Flares // *Solar Physics.* 2006. V. 239. № 1—2. P. 137—148. <https://doi.org/10.1007/s11207-006-0120-7>
- Toriumi S., Wang H.* Flare-productive active regions // *Living Rev. Sol. Phys.* 2019. V. 16. № 3. <https://doi.org/10.1007/s41116-019-0019-7>
- Van Driel-Gesztelyi L., Green L.M.* Evolution of Active Regions // *Living Rev. Sol. Phys.* 2015. V. 12. № 1. <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-1>
- Wang S., Liu C., Liu R., Deng N., Liu Y., Wang H.* Response of the Photospheric Magnetic Field to the X2.2 Flare on 2011 February 15 // *Astrophys. J. Lett.* 2012. V. 745. Article ID L17. 5 p. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/745/2/L17>
- Wang R., Liu Y.D., Hoeksema J.T., Zimovets I.V., Liu Y.* Roles of Photospheric Motions and Flux Emergence in the Major Solar Eruption on 2017 September 6 // *Astrophys. J.* 2018. V. 869. № 2. Article ID 90. 11 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaed48>
- Yang S., Zhang J., Zhu X., Song Q.* Block-induced Complex Structures Building the Flare-Productive Solar Active Region 12673 // *The Astrophysical Journal Letters.* 2017. V. 849. № 2. Article ID L21. 7 p. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9476>
- Zimovets I.V., Wang R., Liu Y.D., Wang C., Kuznetsov S.A., Sharykin I.N., Struminsky A.B., Nakariakov V.M.* Magnetic structure of solar flare regions producing hard X-ray pulsations // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 174. P. 17—27. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.04.017>
- Zimovets I.V., Sharykin I.N., Gan W.Q.* Relationships between photospheric vertical electric currents and hard X-ray sources in solar flares: Statistical study // *Astrophys. J. V.* 891. № 2. 2020a. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab75be>
- Zimovets I.V., Nechaeva A.B., Sharykin I.N., Gan W.Q.* Density distribution of photospheric vertical electric currents in flare-active regions of the Sun // *Astrophys. V.* 63. P. 408—420. 2020b. <https://doi.org/10.1007/s10511-020-09645-0>
- Zimovets I.V., Sharykin I.N.* A brief review on vertical electric currents in flaring active regions at the Sun / Proceedings of the VAK-2021 conference “Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies” (Moscow, August 23—28, 2021). 2022. P. 42—46. <https://doi.org/10.51194/VAK2021.2022.1.1.006>
- Zwaan C.* Elements and Patterns in the Solar Magnetic Field // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1987. V. 25. P. 83—111. <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.25.090187.000503>

Evolution of Characteristics of Vertical Electric Current and Magnetic Field in Active Regions of the Sun and their Relation to Powerful Flares

A. B. Nechaeva^{1, *}, I. V. Zimovets^{1, 2, **}, V. S. Zubik^{2, ***}, I. N. Sharykin^{1, ****}

¹Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Landau Phystech School of Physics and Research, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

* e-mail: nechaeva.workspace@gmail.com

**e-mail: ivanzim@iki.rssi.ru

***e-mail: chernikovasya@gmail.com

****e-mail: ivan.sharykin@phystech.edu

The study of evolution of magnetic field and electric currents in active regions of the Sun over a long-time interval is of interest for understanding the processes of accumulation and release of energy in them, leading to various phenomena that affect space weather. In this work, based on the photospheric vector magnetograms of the Helioseismic and Magnetic Imager instrument aboard the Solar Dynamics Observatory, an analysis was made of the evolution of a number of characteristics of the magnetic field and vertical electric current in three active regions 11158, 11675, and 12673 that produced class M and X flares, during the time from their origin in the Eastern hemisphere, during the passage through the solar disk, and until the disappearance near the Western limb with a step of 2 hours. The characteristics under consideration included: the power-law exponent of the probability density function of the absolute value of the vertical electric current density, the maximum of the absolute value of the vertical current density, the signed and unsigned total vertical currents and the unsigned total vertical and horizontal magnetic fluxes, the energy of the nonlinear force-free and potential magnetic fields, the free magnetic energy, and the number of islands with strong vertical current. Some regularities in the behaviour of the characteristics under consideration are found, in particular regarding the occurrence of solar flares. The correlation coefficients between pairs of these characteristics are calculated. Additionally, M. Aschwanden's approach is shown to be promising for predicting the maximum X-ray class of a flare based on the calculation of the energy of the potential magnetic field in active regions. The results obtained can be used to predict powerful solar flares.