

УДК 523.98

РЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА И ЦЕНТРЫ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ЦИКЛЕ 24

© 2020 г. А. В. Боровик^{1,*}, А. В. Мордвинов^{1,**}, Е. М. Голубева^{1,***}, А. А. Жданов¹

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: aborovik@iszf.irk.ru

**E-mail: avm@iszf.irk.ru

***E-mail: golubeva@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 30.09.2019 г.

После доработки 12.02.2020 г.

Принята к публикации 02.03.2020 г.

Выполнен анализ развития магнитной активности Солнца в цикле 24. Показано, что значительная северо-южная асимметрия магнитной активности сопровождалась асинхронной реорганизацией магнитных полей Солнца в северном и южном полушариях. Изучено формирование униполярных магнитных областей после распада центров активности. Показано, что меридиональный перенос униполярных магнитных областей приводит к изменениям зональной структуры магнитного поля Солнца. Установлено, что долгоживущие центры вспышечной активности существовали в периоды перестройки магнитных полей. Показано, что пространственно-временной анализ вспышечного ансамбля дает возможность для диагностики нестационарных процессов в атмосфере Солнца.

DOI: 10.31857/S0004629920070014

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки и корональные выбросы массы являются взрывными процессами в атмосфере Солнца, которые влияют на состояние околоземного космического пространства. Наблюдения и теоретические исследования вспышек показали, что они инициируются взаимодействием всплывающего магнитного потока с корональными магнитными полями, которое приводит к нарушению их устойчивости [1, 2]. При этом высвобождается энергия магнитных полей, накопленная в ходе их предшествующей эволюции. Согласно существующим моделям [3, 4], необходимым условием для возникновения вспышек является наличие свободной энергии в вышележащих магнитных полях, которые характеризуются значительной скрученностью, сдвиговой структурой и связаны с электрическими токами [5].

Более 90% вспышек на Солнце – вспышки малой мощности с энергией $\leq 10^{29}$ эрг, 1.5% – крупные вспышки, самые мощные из которых характеризуются энергией более 3×10^{32} эрг [6]. Обычно малые вспышки (МВ) возникают в пределах активных областей (АО), но иногда происходят и в спокойных областях без пятен [7–9]. Отмечена тенденция крупных и малых солнечных вспышек образовывать кластеры [10, 11].

Крупномасштабное магнитное поле Солнца во многом определяет физические процессы в ат-

мосфере Солнца и существенно влияет на пространственно-временную организацию различных проявлений солнечной активности [12]. Макроструктура всего ансамбля вспышек определяется выходом новых магнитных потоков, их взаимодействием с ранее существовавшими магнитными полями. Области концентрации малых вспышек представляют интерес для диагностики нестационарных процессов в атмосфере Солнца в глобальном аспекте. Знание закономерностей эволюции ансамбля вспышек имеет практическое значение и необходимо для усовершенствования существующих прогностических моделей.

Продолжительные патрульные наблюдения вспышек, полученные мировой сетью обсерваторий, представляют обширный материал для изучения вспышечной активности Солнца в глобальном аспекте. В настоящей работе изучена пространственно-временная организация малых вспышек в соотношении с эволюцией АО и реструктуризацией магнитных полей в цикле активности.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Чтобы получить статистически достоверное представление о пространственно-временной организации малых вспышек, проанализирована база данных по оптическим вспышкам, охватыва-

Таблица 1. Классификация солнечных вспышек по площади и интенсивности излучения в линии H_{α}

| Площадь | | Отн. интенсивность | | |
|------------|------------|--------------------|----|----|
| кв. град. | мдп | F | N | B |
| ≤ 2.0 | ≤ 100 | SF | SN | SB |
| 2.1–5.1 | 100–250 | 1F | 1N | 1B |
| 5.2–12.4 | 250–600 | 2F | 2N | 2B |
| 12.5–24.7 | 600–1200 | 3F | 3N | 3B |
| > 24.7 | > 1200 | 4F | 4N | 4B |

Таблица 2. Классификация вспышек по амплитуде рентгеновского всплеска (классификация GOES)

| Класс вспышки | Амплитуда рентгеновского всплеска, Вт/м ² |
|---------------|--|
| A | $(1-9.9) \times 10^{-8}$, (A1–A9) |
| B | $(1-9.9) \times 10^{-7}$, (B1–B9) |
| C | $(1-9.9) \times 10^{-6}$, (C1–C9) |
| M | $(1-9.9) \times 10^{-5}$, (M1–M9) |
| X | $(1-9.9) \times 10^{-4}$, (X1–X30) |

ющая циклы 21–24 и представленная в каталогах Quarterly Bulletin on Solar Activity за 1972–1975 гг. и Solar Geophysical Data за 1975–2017 гг.¹ В рамках исследований МВ такой объемный набор данных рассмотрен впервые.

Существуют две основные классификации солнечных вспышек – в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн, которые дополняют друг друга. Согласно Международной классификации [13–15] оптические вспышки по наблюдениям в линии H_{α} в зависимости от площади делятся на пять классов (S, 1, 2, 3, 4), в зависимости от интенсивности излучения – на три (F – слабые, N – умеренные и B – яркие). Сочетание этих двух параметров (площади и интенсивности) составляет оптический балл вспышки (табл. 1). Интенсивность вспышки выражается в единицах интенсивности прилегающей к ней невозмущенной хромосферы. Вспышка с относительной интенсивностью 160–260% считается слабой (F), 260–360% – умеренной (N), свыше 360% – яркой (B).

Класс вспышки в рентгеновском диапазоне определяется в зависимости от максимальной амплитуды рентгеновского всплеска в диапазоне энергий 0.5–10 кэВ по данным измерений на спутниках GOES в диапазоне 1–8 Å (табл. 2). Каждый из классов A–M разделен на 9 подгрупп от 1 до 9 (класс X от 1 до 30). Вспышка класса M1 в 10 раз мощнее C1, а X1 в 10 раз мощнее M1 и в 100 раз мощнее S1. Индекс A указывает, во сколь-

ко раз вспышка превосходит нулевой уровень. Обе классификации солнечных вспышек дополняют друг друга и приводятся в мировых центрах данных. В оптическом диапазоне длин волн малые вспышки (MB) относятся к классу S (суб-вспышки) и имеют площадь менее 2 кв. град (100 мдп (миллионных долей площади полусферы Солнца)).

Для каждого кэррингтоновского оборота (КО) построена синоптическая карта плотности распределения МВ по ячейкам $2^{\circ} \times 1^{\circ}$ кэррингтоновской координатной сетки. Такой шаг выбран, поскольку площадь отдельной МВ не превышает 2 кв. град. Связные группы ячеек, в которых наблюдались две и более МВ, рассматриваются как центры вспышечной активности (ЦВА). Для каждого ЦВА определены координаты (положение “центра тяжести” в распределении соответствующих МВ), время начала и окончания МВ и мощность (число МВ) при единичном прохождении ЦВА по диску Солнца, а также промежутки времени между повторными появлениями ЦВА с одними и теми же координатами.

По картам распределения вспышек, полученным в период 2009–2017 гг., исследована динамика ЦВА в цикле 24. Чтобы проследить причинно-следственные отношения между динамикой вспышечной активности и эволюцией солнечных магнитных полей в цикле 24, дополнительно был составлен ряд кэррингтоновских распределений, сочетающих синоптические карты ЦВА и магнитных полей.

Для расчета усредненных распределений магнитного поля в гелиографической системе координат использованы синоптические карты радиальной составляющей из архива² NSO/GONG [16]. Исходные карты представлены в формате FITS в цилиндрической равновеликой проекции и содержат 360 точек по долготе и 180 точек по синусу широты, с равномерным шагом по осям.

Вся последовательность синоптических карт магнитного поля была усреднена по пяти смежным КО. При этом карта для центрального КО оставалась без изменений, а к распределениям магнитных полей на двух предыдущих и двух последующих картах применялась коррекция за дифференциальное вращение [17].

$$\omega = 14.33(\pm 0.054) - 2.12(\pm 0.35)\sin^2 \varphi - 1.83(\pm 0.38)\sin^4 \varphi. \quad (1)$$

Здесь φ – гелиографическая широта, ω – угловая скорость [град/сут]. Методика усреднения синоптических карт позволяет выделять в каждом КО долгоживущие магнитные образования и отслеживать их эволюцию от оборота к обороту. Ра-

¹ <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>

² <https://gong.nso.edu/data/magmap>

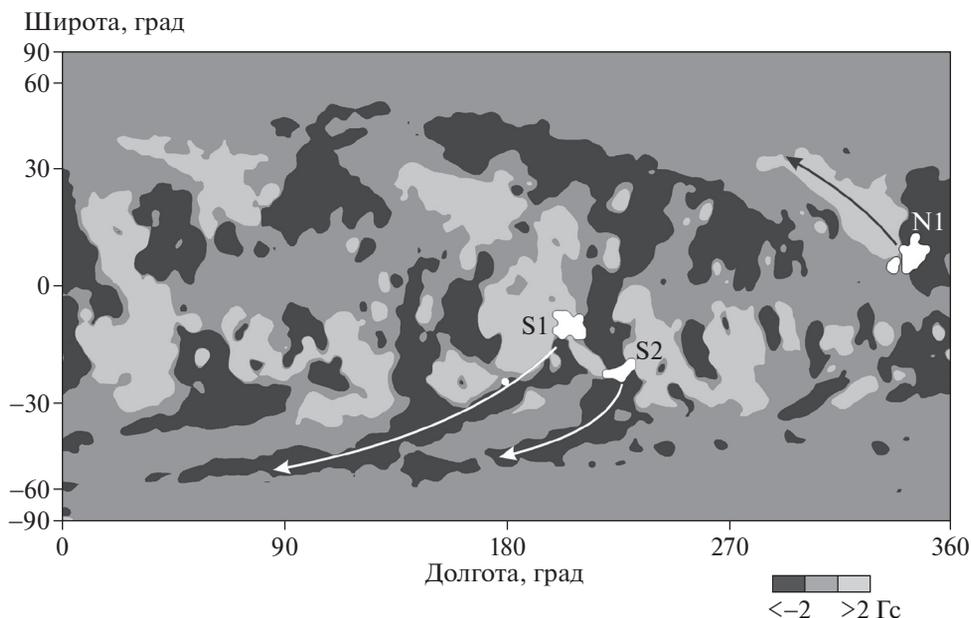


Рис. 1. Усредненная синоптическая карта магнитных полей для КО 2142. УМО положительной (≥ 2 Гс) и отрицательной (≤ -2 Гс) полярностей показаны светло-серыми и темно-серыми тонами. Магнитные поля (от -2 до 2 Гс) показаны серым цветом нейтрального оттенка. Белым цветом показаны ЦВА N1, S1, S2 (>2 МВ/кв. град.). Стрелками указаны серджи.

нее аналогичная методика применялась для изучения реорганизации магнитных полей и корональных дыр в циклах 23–24 [18].

На рис. 1 показана усредненная синоптическая карта магнитных полей для КО 2142. Распределение магнитных полей сглажено с помощью вейвлет-фильтрации. Униполярные магнитные области (УМО) положительной (≥ 2 Гс) и отрицательной (≤ -2 Гс) полярностей показаны светло-серыми и темно-серыми тонами соответственно. Области относительно слабых магнитных полей (от -2 до 2 Гс) показаны на карте серым цветом нейтрального оттенка (согласно палитре снизу).

На фоне распределения магнитных полей белыми пятнами показаны области повышенной плотности МВ в гелиографических координатах. В период с 28 сентября по 25 октября 2017 г. МВ концентрировались в трех областях, отмеченных обозначениями N1, S1 и S2, где буквы обозначают их положение в северном или южном полушариях. Согласно критерию, принятому в настоящем исследовании, ЦВА идентифицируются при плотности свыше двух МВ/(кв. град). В соответствии с этим критерием проведены границы ЦВА на рис. 1.

Все ЦВА расположены вблизи оснований так называемых серджей, которые образуются после распада долгоживущих центров активности. УМО преимущественно хвостовых полярностей переносятся в высокие широты, формируя серджи [19]. Форма серджей определяется процесса-

ми диффузии и переноса слабых магнитных полей в поверхностных слоях Солнца [20]. Такие серджи играют важную роль в глобальной реорганизации магнитных полей Солнца [21].

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОВ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ, ИХ СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ В ЦИКЛЕ 24

Центры вспышечной активности располагаются главным образом в хвостовой и центральной частях АО [10]. Как правило, ЦВА имеет ядро (иногда два), где плотность МВ максимальна. От ядра к периферии их число снижается. Со временем активность ЦВА меняется. Во время интенсивного роста АО частота МВ резко увеличивается, происходят серии вспышек [22]. Интервал между вспышками составляет около 20 мин.

Крупные вспышки классов 2–4 (с площадью более 25 кв. град.) происходят на фоне слабой активности МВ или в их отсутствие. В среднем за 7.8 часа до крупной вспышки МВ прекращаются и могут возобновиться не ранее чем через 6.7 часа после ее начала [23]. При этом ленты крупных вспышек развиваются в областях, где МВ не было или их число было незначительно, что обуславливает накопление свободной магнитной энергии, достаточной для возникновения мощной вспышки в АО.

Таблица 3. Вспышечная активность в цикле 24

| Проявления вспышечной активности | n | n_N | n_S | a | $c(n, W)$ |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Вспышки класса s | 11323 | 5369 | 5954 | -0.05 | 0.77 |
| Вспышки класса 1 | 675 | 261 | 414 | -0.23 | 0.68 |
| Вспышки классов 2–4 | 146 | 54 | 92 | -0.26 | 0.52 |
| Вспышки классов s 1–4 | 12144 | 5684 | 6460 | -0.06 | 0.77 |
| Центры вспышечной активности | 650 | 330 | 320 | 0.02 | 0.82 |

Примечание. Приведены: n – полный размер выборки; n_N и n_S – размеры компонент выборки, соответствующих северному (N) и южному (S) полушариям; a – северо-южная асимметрия ($a = (n_N - n_S)/(n_N + n_S)$); $c(n, W)$ – коэффициент корреляции элементов общей выборки с числами Вольфа W . Для вспышек приведены классы площади s , 1–4.

Анализ данных за циклы 21–24 показал, что 93.3% ЦВА наблюдаются исключительно в течение единичного прохождения по диску Солнца, 6.7% в двух и более КО, отдельные ЦВА существуют до четырех КО. Было рассмотрено 5914 случаев прохождения ЦВА по диску Солнца в пределах 65° от центрального меридиана, безотносительно к общей продолжительности наблюдения каждого ЦВА, которая могла достигать нескольких КО. При этом оценка временного промежутка между первой и последней МВ составила в среднем около 3.6 сут. Вообще, этот временной промежуток в 90% случаев не превышал 8.6 сут. Продолжительность активности подавляющего большинства ЦВА в период прохождения по диску варьирует приблизительно от 1.6 до 9 сут (ЦВА площадью от 4 до 68 кв. град соответственно), и в крайне редких случаях может достигать 11 сут (ЦВА площадью более 70 кв. град, наблюдаемые в АО с крупными группами солнечных пятен). Площадь ЦВА в 90% случаев составляет от 4 до 28 кв. град, а в среднем ~ 12 кв. град.

Эволюция отдельных ЦВА во многом определяется пространственно-временной организацией МВ. Их подавляющий статистический вес очевиден из приведенной в табл. 3 сводки вспышечной активности в цикле 24. Поэтому наблюдается высокая корреляция (0.8) между числом ЦВА n и числами Вольфа W , хотя с ростом охватываемой вспышками площади отмечается падение значений их северо-южной асимметрии a и коэффициента корреляции $c(n, W)$. Очевидны следующие отличительные особенности малых вспышек: несущественная северо-южная асимметрия, отсутствие значимой корреляции между числом вспышек в обоих полушариях и довольно высокая корреляция числа вспышек с числами Вольфа.

На рис. 2 показаны изменения числа МВ в северном и южном полушариях Солнца в цикле 24. В северном полушарии всплески числа МВ наблюдались в начале 2010 г., в 2011 г., во второй половине 2016 г. В южном полушарии значительные всплески числа МВ пришлось на середину 2012 и

конец 2014 г. Отмечается почти двукратное преобладание числа МВ в южном полушарии со второй половины 2013 по начало 2015 г.

4. ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА И ЕГО ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Цикл 24 характеризуется низким уровнем магнитной активности, которая развивалась асинхронно в северном и южном полушариях Солнца. На рис. 3а, в показаны изменения площадей солнечных пятен в северном и южном полушариях Солнца (A_N , A_S). Распределение площадей солнечных пятен по гелиошироте оценено по данным, подготовленным в синоптическом формате³. Площади солнечных пятен характеризуют всплывающие магнитные потоки, пространственно-временная организация которых определяет особенности цикла 24.

Для изучения эволюции фотосферных магнитных полей выполнен широтно-временной анализ всей последовательности синоптических карт за период 2009–2018 гг. Каждая карта усреднялась по гелиодолготе, чтобы получить широтный профиль, характеризующий зональную структуру магнитного поля для данного КО. Широтные профили всех карт были выстроены в хронологическом порядке в виде широтно-временного распределения, которое сглажено с помощью вейвлет-фильтрации. Сглаженное распределение показано на рис. 3б. Области, в которых доминирует положительная либо отрицательная полярность, показаны в бело-серых и черно-серых тонах соответственно.

Такая диаграмма наглядно показывает эволюцию магнитного поля, его глобальную реорганизацию в период обращения магнитных полей на полюсах Солнца. Смена знака магнитного поля на северном полюсе произошла в 2013 г., на южном полюсе в 2015 г. Эти изменения связаны с ме-

³ <http://solarcyclescience.com>

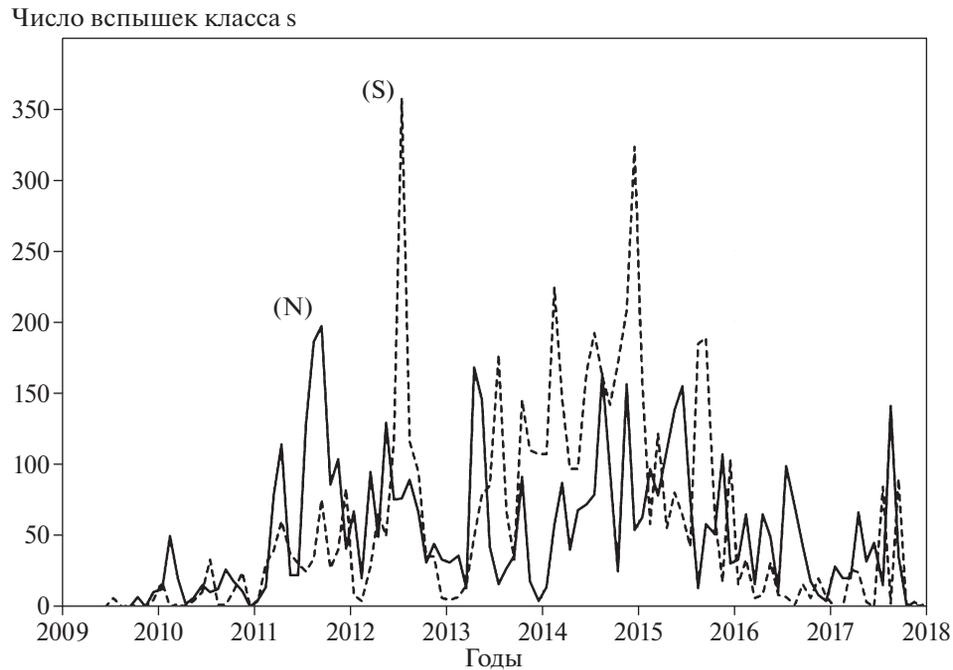


Рис. 2. Изменения чисел МВ в северном (N, сплошная линия) и южном (S, штриховая линия) полушариях Солнца.

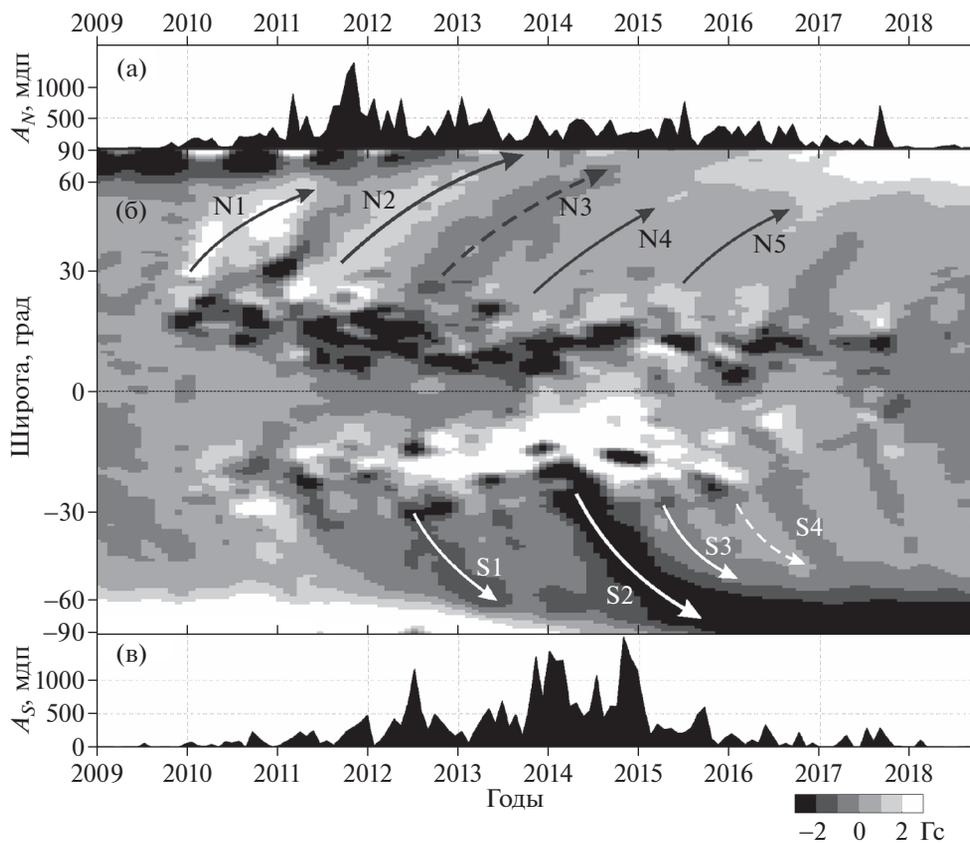


Рис. 3. Изменения площадей солнечных пятен в северном (а) и южном (в) полушариях. В центре (б) представлено широтно-временное распределение усредненных по гелиодолготе магнитных полей. Сердцы хвостовых и ведущих полярностей указаны сплошными и штриховыми стрелками.

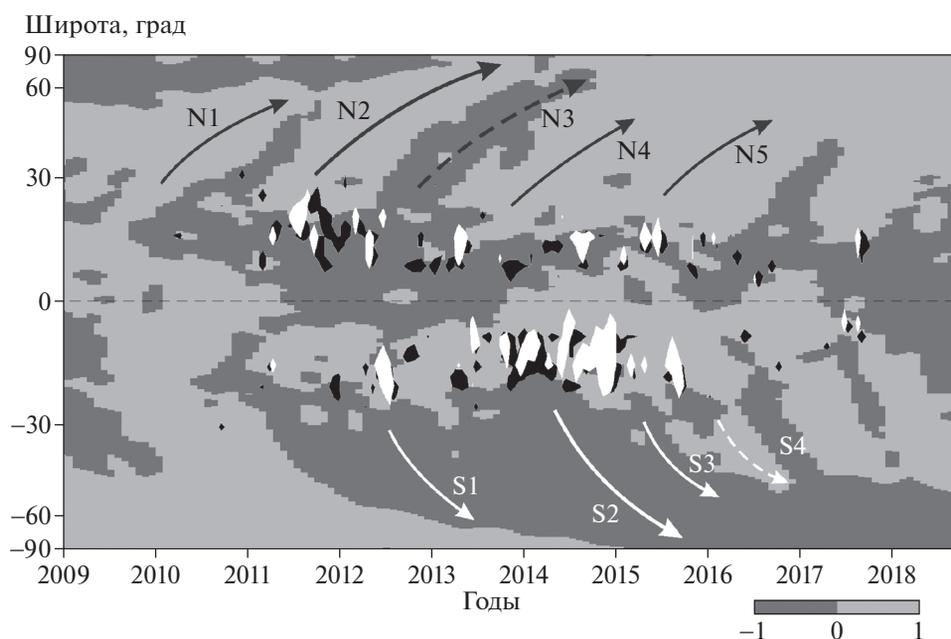


Рис. 4. Широтно-временное распределение доминирующих магнитных полярностей в светло-серых (положительные) и темно-серых (отрицательные) тонах. Серджи указаны стрелками. Зоны интенсивного пятнообразования (>100 мдп) и зоны частого появления МВ (>30 вспышек) представлены черными и белыми пятнами соответственно.

ридиональным переносом УМО преимущественно хвостовых полярностей, которые формируются после распада долгоживущих комплексов активности [19, 24].

В период 2009–2011 гг. магнитная активность Солнца преобладала в северном полушарии (рис. 3а). В ходе эволюции центров активности и после их распада слабые магнитные поля рассеялись в окружающей фотосфере, образуя УМО. В соответствии с законом Джоя, УМО хвостовых полярностей формировались на более высоких широтах по сравнению с УМО ведущих полярностей. В начале цикла в северном полушарии меридиональный перенос привел к образованию двух сердечей хвостовой полярности, на рис. 3б они отмечены сплошными стрелками (N1, N2). Перенос магнитного потока положительной полярности привел к смене доминирующей полярности на северном полюсе Солнца.

Дальнейшее возникновение и распад центров активности в северном полушарии привели к формированию сердечей ведущей (N3) и хвостовых полярностей (N4, N5), отмеченных штриховой и сплошными стрелками. Причины возникновения сердечей ведущих полярностей и их влияние на полярное магнитное поле исследованы ранее [25].

Развитие пятенной активности в южном полушарии (рис. 3в) значительно отставало от того, что наблюдалось в северном. Можно выделить несколько долгоживущих центров активности, с

которыми связаны серджи (S1, S2, S3, S4). Максимум активности в южном полушарии пришелся на 2014 г. После распада самых крупных центров активности сформировался обширный сердж отрицательной (хвостовой) полярности (S2), который достиг высоких широт и привел к смене доминирующей полярности в полярной зоне южного полушария [26]. Глобальная перестройка магнитных полей в фотосфере сопровождалась изменениями открытых магнитных полей и формированием полярных корональных дыр [21].

На рис. 4 показана широтно-временная диаграмма в виде схемы, представляющей распределение доминирующих полярностей. По аналогии с рис. 3б стрелки указывают меридиональный перенос магнитного потока. Основания стрелок расположены вблизи зон интенсивного пятнообразования, которые показаны черным цветом. Границы этих зон соответствуют условию, при котором зональные плотности площадей солнечных пятен превышают 100 мдп. В этих зонах всплывали магнитные потоки, формировались и распадались крупные АО. На этих широтах концентрировалась магнитная активность и наблюдались долгоживущие комплексы активности. Области повышенной вспышечной активности образовались вблизи зон интенсивного всплывания магнитного потока. На широтно-временной диаграмме области концентрации МВ отмечены белым цветом.

Анализ широтно-временных распределений показывает, что ЦВА концентрируются вблизи границ раздела УМО противоположных полярностей, где формируются серджи. На этих широтах происходит перестройка зональной структуры магнитных полей. Такая реструктуризация магнитных полей сопровождалась повышенной вспышечной активностью.

В ходе меридионального переноса УМО противоположных полярностей расходятся. При расхождении биполярных структур в вышележащих слоях солнечной атмосферы формируются горизонтальные магнитные поля. Такие поля проявляются в хромосфере и короне Солнца [19, 27]. Наличие ранее возникших и вышележащих магнитных полей важно для образования вспышек. Теоретические модели возникновения малых вспышек предполагают существование таких магнитных полей. Согласно модели [28], вспышки, имеющие вид простой петли, возникают при всплытии нового потока в существующих АО. Аналогичные конфигурации возникают тогда, когда взаимодействуют магнитные поля, связанные с арками разных размеров. Действительно, если всплывающие магнитные биполи ориентированы различным образом, то в вершинах связанных с ними арок возникают условия для пересоединения магнитных полей и возникновения вспышек. Внутри долгоживущих комплексов активности магнитные потоки всплывают многократно, создавая условия для возникновения многих солнечных вспышек.

5. ВЫВОДЫ

В настоящей работе изучена пространственно-временная организация малых вспышек в соотношении с магнитными полями Солнца. Выполнен анализ развития активности в цикле 24. Изучены эволюция магнитных полей, их глобальная реструктуризация. Выявлены центры вспышечной активности (ЦВА), в которых сконцентрированы малые вспышки. Показано, что данные об эволюции ЦВА дают возможность диагностики нестационарных процессов в атмосфере Солнца в глобальном аспекте.

Выполнен анализ широтно-временных распределений магнитных полей и малых солнечных вспышек. Показано, что циклические изменения зональной структуры магнитного поля Солнца приводят к изменениям его вспышечной активности. После распада долгоживущих центров активности происходят процессы, охватывающие все слои атмосферы Солнца. В фотосфере формируются униполярные магнитные области, которые переносятся в высокие широты меридиональными течениями. Широтно-временной анализ показал, что малые вспышки часто появ-

ляются вблизи границ долгоживущих магнитных структур, где происходит интенсивное всплытие нового магнитного потока и накопление свободной энергии в вышележащих магнитных полях.

Наибольшая концентрация малых вспышек наблюдается там, где происходит разделение УМО противоположных полярностей и формируются серджи остаточного магнитного потока. В таких условиях в вышележащих слоях атмосферы формируются магнитные поля со значительной горизонтальной составляющей. Взаимодействие новых всплывающих магнитных потоков с вышележащими магнитными полями приводит к образованию ЦВА. Значительная северо-южная асимметрия пятнообразовательной активности Солнца привела к асинхронной реструктуризации магнитных полей и асимметрии в распределении центров вспышечной активности в цикле 24.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания П.16 и поддержана грантом РФФИ 19-52-45002 инд.

БЛАГОДАРНОСТИ

В настоящем исследовании использованы синоптические карты магнитных полей, построенные по измерениям телескопов GONG, и данные о вспышечной активности Солнца, представленным на сайте <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. O. Benz*, *Liv. Rev. Solar Physics* **5**, 1 (2008).
2. *M. Aschwanden*, *Physics of the Solar Corona* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005).
3. *J. Heyvaerts, E. R. Priest, and D. M. Rust*, *Astrophys J.* **216**, 123 (1977).
4. *B. V. Somov*, in *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity*, edited by A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, and A. G. Kosovichev, *IAU Symp.* **223**, 417 (2004).
5. *A. A. Pevtsov, M. A. Berger, A. Nindos, A. A. Norton, and L. van Driel-Gesztelyi*, *Space Sci. Rev.* **186**, 285 (2014).
6. *A. V. Borovik, A. A. Zhdanov*, *Solar-Terrestrial Phys.* **3**(1), 40 (2017).
7. *H. W. Dodson and E. R. Hedeman*, *Solar Phys.* **13**, 401 (1970).
8. *L. Atlas*, *Solar Phys.* **151**, 169 (1994).
9. *А. В. Боровик, Д. Ю. Мячин, В. М. Томозов*, *Изв. ИГУ, сер. Науки о Земле* **7**, 23, (2014).
10. *А. В. Боровик*, *Исслед. по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца* **102**, 133 (1994).
11. *T. Bai*, *Astrophys J.* **328**, 860 (1988).
12. *V. N. Obridko and B. D. Shelting*, *Astron. Rep.* **57**, 786 (2013).
13. *С. Смит, Е. Смит, Солнечные вспышки* (М.: Мир, 1966).

14. *A. T. Altyntsev, B. G. Babin, G. V. Kuklin, B. M. Tomozov, Солнечные вспышки* (М.: Наука, 1982).
15. *M. Temmer, A. Veronig, A. Hanslmeier, W. Otruba, and M. Messerotti, Astron. and Astrophys.* **375**, 1049 (2001).
16. *K. S. Balasubramaniam, A. Pevtsov, in Solar Physics and Space Weather Instrumentation IV* **8148**, id. 814809.(2011).
17. *R. F. Howard, J. W. Harvey, and S. Forgach, Solar Phys.* **130**, 295 (1990).
18. *E. M. Golubeva, A. V. Mordvinov, Solar Phys.* **291**, 3605 (2016).
19. *G. J. D. Petrie, Liv. Rev. Solar Physics* **12**, 5 (2015).
20. *Y.-M. Wang, A. G. Nash, and N. R. Sheeley, Jr., Science* **245**, 712 (1989).
21. *E. M. Golubeva and A. V. Mordvinov, Solar Phys.* **292**, 190 (2017).
22. *A. B. Borovik, V. M. Grigoryev, N. N. Kargapolova, B. E. Merkulenko, et al., Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso* **15**(1), 211 (1986).
23. *А. В. Боровик, Исслед. по геомагнетизму, аэронамике и физике Солнца* **102**, 118 (1994).
24. *А. В. Мордвинов, С. А. Язев, Астрон. журн.* **90** 491 (2013).
25. *A. V. Mordvinov and L. L. Kitchatinov, Solar Phys.* **294**, 21 (2019).
26. *X. Sun, J. T. Hoeksema, Y. Liu, and J. Zhao, Astrophys. J.* **798**, 114 (2015).
27. *A. R. Yeates, J. A. Constable, and P. C. H. Martens, Solar Phys.* **263**, 121 (2010).
28. *Е. Прист, Солнечная магнитогидродинамика* (М.: Мир, 1985).