

## ИТОГИ И УРОКИ 24 ЦИКЛА – ПЕРВОГО ЦИКЛА ВТОРОЙ ЭПОХИ Пониженной Солнечной Активности

© 2022 г. В. Н. Ишков\*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
Москва, Россия

\* E-mail: [ishkov@izmiran.ru](mailto:ishkov@izmiran.ru)

Поступила в редакцию 14.04.2021 г.

После доработки 01.11.2021 г.

Принята к публикации 01.11.2021 г.

Прошедший 24 цикл солнечной активности реализовался в условиях, когда после переходного 23 цикла фоновые значения общего магнитного поля Солнца уменьшились более чем в два раза, что привело к полной перестройке физических условий на Солнце, и, как следствие, в гелиосфере, и отразилось на состоянии околоземного космического пространства. Он реализовался как цикл низкой величины, пятнообразовательная и вспыхивающая активность которого существенно ниже всех предыдущих солнечных циклов космической эры, и впервые на достоверном ряде наблюдений солнечных пятен предоставил возможность детально исследовать ход его развития как начального цикла эпохи пониженной солнечной активности.

*Ключевые слова:* солнечные циклы, эпохи солнечной активности

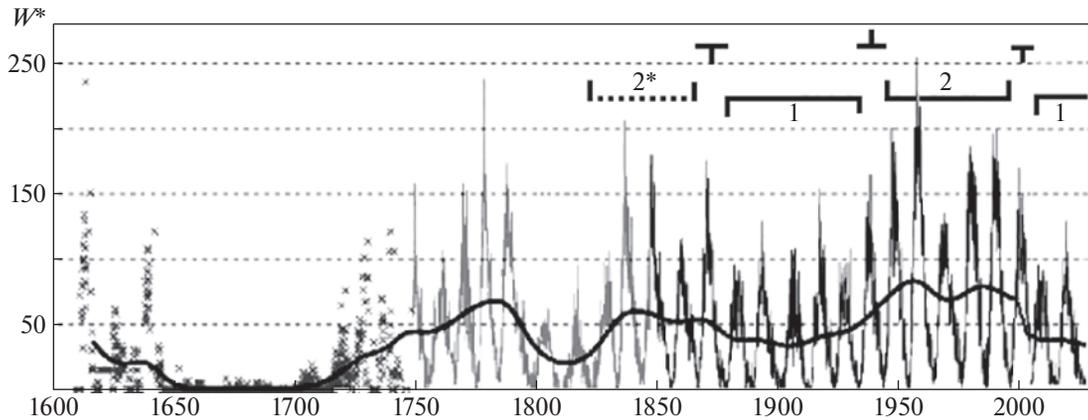
**DOI:** 10.31857/S0004629922020050

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечной активностью (СА) принято называть всю совокупность наблюдаемых явлений в атмосфере Солнца, вызывающих изменения его излучения в различных диапазонах электромагнитных волн и потоках частиц различных энергий. Эти изменения проявляются в изменении количества солнечных активных структур, в изменении солнечной постоянной  $\leq 0.1\%$  и почти незаметны в диапазоне оптического излучения. Однако в диапазоне мягкого рентгеновского излучения Солнце ведет себя как переменная звезда – разница уровня фонового излучения в стандартном диапазоне 0.1–0.8 нм (1–12.5 кэВ) в максимуме и в минимуме СА превышает два порядка, а в диапазоне радиоизлучения фоновые значения на стандартной волне 2800 МГц (10.7 см) могут изменяться в три раза.

Состояние СА характеризуется наблюдательными индексами. Наиболее длительный ряд имеет относительное число солнечных пятен (W). Этот индекс впервые введен Р. Вольфом, и определяется с 1849 г. (*достоверный* ряд W1), когда регулярные наблюдения солнечных пятен стали вести несколько обсерваторий в Европе и, вскоре, в Индии, перекрывая световой день в планетарном масштабе. Кроме того, Вольф восстановил среднемесячные значения данного индекса до 1749 г. и пронумеровал его, получив *пронумерованный*

ряд W2. Среднегодовые значения были восстановлены до 1700 г. по отрывочным данным отдельных европейских наблюдателей. Современные исследователи по литературным данным качественно продлили этот ряд до 1610 г. В работе [1] было проведено сравнение рядов W1 и W2, проверены их согласованность и спектральные характеристики, показано, что характер поведения “мгновенных” частот и огибающих на интервале 1749–1849 гг. сильно отличается от достоверного ряда, увеличение длины ряда ведет к ухудшению разрешения значимых спектральных характеристик (обычно наоборот), наблюдается существенное искажение “высокочастотной” части спектра. Этот результат приводит к выводу о невозможности использования восстановленного интервала и, следовательно, всего пронумерованного ряда W2 относительных чисел солнечных пятен для исследования влияния СА на различные долговременные природные процессы, а можно пользоваться лишь достоверным рядом W1 (1849–2021 гг.). Надо отметить, что с 1 июля 2015 г. Мировой центр данных для получения, сохранения и распространения международного числа солнечных пятен в Брюсселе (<http://sidc.oma.be/silso/home>) прекратил вычисление международного (Цюрихского) числа солнечных пятен (система V1) и перешел на новую систему определения относительного числа пятен V2, в которой значимо



**Рис. 1.** Полный ряд наблюдений сглаженных ( $W^*$ ) относительных чисел солнечных пятен. Достоверный ряд ( $W^*1$ ) с 1849 г. (черный) с границами структурных эпох пониженной (1) и повышенной (2) СА с переходными циклами между ними (T – к пониженной; L – к повышенной). В первом периоде повышенной СА (2\*), включающей СЦ 10 – 6, циклы 6 и 7 включены условно. Вероятный ход развития 25 СЦ (последний справа). Восстановленный ряд ( $W^*2$ ) – серый, предполагаемый – крестики. Преобразованный рисунок из Википедии <http://en.wikipedia.org/wiki/Sunspot>.

увеличился вес наблюдаемых групп пятен (<http://sidc.oma.be/silso/newdataset>). В результате эти два ряда, которые в оригинале отличались в основном по долгосрочным трендам, были приведены “в согласие”, и тренд был минимизирован. В данной статье мы остаемся в рамках классической системы VI, использование новой системы особо оговаривается.

Вторым по длительности достоверных наблюдений индексом активности является ежедневное число групп солнечных пятен, которое определяется с 1874 г. по данным ежедневных наблюдений в Гринвичской обсерватории.

Одной из самых замечательных особенностей Солнца являются регулярные, почти периодические 11-летние изменения солнечных индексов – солнечные циклы (СЦ), которые в паре составляют физический 22-летний солнечный цикл в магнитном поле нашей звезды. Достоверный ряд чисел Вольфа (15 полных СЦ, с 10 по 24) сохраняет удивительное постоянство в основных проявлениях развития отдельных 11- и 22-летних СЦ, а структура его цикличности показывает периодическую смену эпох повышенной (СЦ 6–9<sup>1</sup>; 10; 18–22) и пониженной (СЦ 12–16; 24 и 4 последующих) СА (рис. 1), каждая по пять циклов [2]. Принципиальные различия характеристик и основных свойств СЦ различных эпох СА определяются разным диапазоном изменений величин средних (фоновых) значений общего магнитного поля Солнца, что определяет характер пятнообразовательной деятельности и общие характеристики циклов внутри эпох СА. В данной статье основные временные интервалы хода развития любого СЦ определяются следующим образом:

<sup>1</sup> Восстановленные СЦ.

под фазой минимума понимается интервал времени, когда сглаженные среднемесячные значения ( $W^*$ ) относительных чисел солнечных пятен остаются в пределах  $W^* \leq 30$ . Фаза минимума, таким образом, является общей для текущего и последующего СЦ, однако точку (месяц) минимума принято относить к завершающемуся СЦ. Для отдельного СЦ необходимо различать временные отрезки фазы минимума от начала цикла до месяца с  $W^* = 30$  – фаза минимума ветви роста – и последующей фазы минимума после максимума цикла от месяца с  $W^* = 30$  и до конца СЦ – фаза минимума ветви спада. Под фазой максимума здесь понимается временной интервал значений  $W^*$  в пределах 15% от значения  $W^*_{\max}$ . Соответственно, фаза роста – между  $W^* = 30$  ветви роста и  $W^*_{\max}$ , а фаза спада – от максимума цикла до  $W^* = 30$  ветви спада.

Исследования характерных признаков и закономерностей развития СЦ разных эпох позволило сделать вывод [2], что для всей совокупности достоверных циклов, независимо от эпох, строго выполняются закономерности, связанные с магнитными свойствами Солнца, такими как 22-летний цикл полной смены полярности полюсов магнитного поля в фазе максимума 11-летнего цикла (переполусовка). Отсюда следует закон Хейла: магнитные полярности головного и хвостового пятен в каждом полушарии меняют знак на противоположный при последовательном переходе от одного цикла к другому. Это же относится и к закону Джойса – изменение угла наклона биполярных структур (от ведущего пятна к хвостовому) в зависимости от их гелиошироты, причем ведущие пятна расположены ближе к экватору, и по правилу Вальдмаера: чем больше скорость роста цикла, тем он выше. Внутри эпох

**Таблица 1.** Солнечные циклы достоверных эпох пониженной солнечной активности

$N$	$T_0$	$W_m^*$	$T_M$	$T_e$	$W_M^*$	$T_Y \uparrow$	$T_Y \downarrow$	$T_Y$	$T_{1m}$	$T_{2m}$	$Sp_{less}$
12	1878 12	2.2	1883 12	1890 02	74.6	5.0	6.3	11.3	65 <sup>m</sup>	59 <sup>m</sup>	732
13	1890 03	5.0	1894 01	1901 02	87.9	4.5	8.2	12.1	59 <sup>m</sup>	77 <sup>m</sup>	937
14	1902 01	2.6	1906 02	1913 07	64.2	4.1	7.6	11.7	77 <sup>m</sup>	59 <sup>m</sup>	1045
15	1913 08	1.5	1917 08	1923 07	105.4	4.0	6.1	10.1	59 <sup>m</sup>	48 <sup>m</sup>	526
16	1923 08	5.6	1928 04	1933 08	78.1	4.7	5.6	10.3	48 <sup>m</sup>	54 <sup>m</sup>	666
24	2009 01	1.7	2014 04	2019 12	81.9	5.3	5.7	11,0	68 <sup>m</sup>	42 <sup>m</sup>	878
25	2020 01	1.3	<i>2024 04</i>	<i>2032 03</i>	<i>~90</i>						
$\Sigma$		2.8			82.0	4.6	6.6	10.9	63 <sup>m</sup>	56 <sup>m</sup>	797

$T_0$  – начало СЦ;  $W_m^*$  – начальное значение сглаженных чисел Вольфа;  $T_M$  – время максимума СЦ;  $T_e$  – конец СЦ;  $W_M^*$  – максимальное значение сглаженных чисел Вольфа;  $T_Y \uparrow$  – длительность ветви роста в годах;  $T_Y \downarrow$  – длительность ветви спада в годах;  $T_Y$  – длительность СЦ в годах;  $T_{1m}$ ,  $T_{2m}$  – длина фазы минимума перед фазой роста и после фазы спада данного СЦ в месяцах;  $Sp_{less}$  – количество беспятенных дней в соответствующих фазах минимумов;  $\Sigma$  – средние величины по эпохам; курсив – прогнозируемые значения.

несомненно выполняется и правило Гневывшева-Оля: нечетный 11-летний цикл выше, чем предшествующий четный цикл. На данной статистике в эпохи повышенной СА не наблюдалось низких циклов, а в эпоху пониженной СА – высоких. Средняя сглаженная за эпоху площадь групп пятен в эпохи повышенной СА вдвое превышает это значение в эпохи пониженной СА, а среднее число беспятенных дней на видимом диске Солнца в первых более чем в 2.5 раза меньше [2]. Наиболее мощные (для данного цикла) вспышечные события внутри эпох обычно происходят на фазе спада цикла и в начальной стадии фазы минимума, более редко на фазе роста и на фазе максимума.

Между эпохами наблюдаются переходные периоды (циклы 11, 17 и 23), во время которых примерно за 17 лет (т.е. процессы перехода захватывают и части соседнего СЦ, предыдущего и/или последующего), меняется режим генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне, что и приводит к изменениям пятнообразовательной активности Солнца. В переходные периоды могут нарушаться некоторые из наблюдательных правил развития циклов, что и произошло в циклах 22 и 23 с правилом Гневывшева-Оля, когда четный 22-й цикл (наибольший среди четных) единственный раз в истории достоверного ряда стал выше нечетного 23-го, и большинство самых мощных вспышечных событий в СЦ22 осуществились в фазе максимума, а на фазах спада и минимума больших солнечных вспышечных событий (рентгеновского класса  $\geq X$ ) не наблюдалось. Большинство экстремальных солнечных вспышечных событий происходили именно в переходные периоды.

Первая эпоха пониженной СА длилась с 1878 по 1933 г. (5 СЦ), но в то время наблюдательные данные о Солнце ограничивались наблюдениями

пятен, числом и площадями групп солнечных пятен, состоянием и вариациями геомагнитного поля: величиной возмущения геомагнитного поля (Аа-индекс) по двум разнесенным по полушариям среднеширотным геомагнитным обсерваториям, осуществляющим непрерывную запись состояния магнитного поля Земли. По этим непрерывным данным легко выделялись внезапные кратковременные возрастания геомагнитного поля (SC) – внезапные начала, отражающие в современном понимании приход в околоземное космическое пространство (ОКП) межпланетных ударных волн. Кроме того, по записям вариаций геомагнитного поля можно выделить и так называемые “кроше” (фр. *crochet*, крючок), появляющиеся в момент облучения ионосферы Земли в максимуме достаточно мощной солнечной вспышки. По этим наблюдениям можно оценить ход развития и, в некотором приближении, характер вспышечной активности и ее геоэффективность в первую эпоху “пониженной” СА. Только с началом космической эры (СЦ19, начало 1960-х годов) наблюдения Солнца и его влияния на ОКП становятся регулярными и все более полными.

В табл. 1 приводятся основные характеристики СЦ эпох пониженной СА, из которой следует, что на данной статистике все низкие циклы были четными и с учетом СЦ24 имеют следующие качественные и количественные (в среднем) характеристики [2]:

- более низкие начальные значения  $W_{min}^*$  (3.38) и большую длительность (11.1 г.);
- более продолжительные (4.9 г.) ветви роста и более короткие (6.1 г.) ветви спада;
- многовершинность (не менее двух) фазы максимума для низких циклов, причем самый

**Таблица 2.** Основные эволюционные параметры СЦ24

<p>– начало: 01.2009 (<math>W_{\min}^* = 1.8</math>);</p> <p>– начало фазы роста: 04.2011 г. (<math>W^*30</math>);</p> <p>– первый максимум: <math>W^* = 45.5</math>: 11.2011 г.</p> <p>– максимум цикла: 04.2014 г. <math>W_{\max}^* = 81.9</math>;</p> <p>– максимум потока радиоизлучения на волне 10.7 см: 06.2014 г. (<math>F_{\max}^* = 145.5</math> сеп);</p> <p>– переполюсовка общего магнитного поля Солнца: 05.2012 – 06.2015 г.</p>	<p>– ветвь роста: 5.3</p> <p>– фаза максимума цикла: 08.2013–07.2014 г.</p> <p>– начало фазы спада 07.2014 г.;</p> <p>– ветвь спада: <math>\geq 5.7</math> г.;</p> <p>– начало фазы минимума (<math>W^* \leq 30</math>) – 04.2016 г.</p> <p>– точка минимума цикла: 12.2019 г. (<math>W^* \leq 1.3</math>); по радиоизлучению на 10.7 см в (<math>\leq 69.3</math> сеп)</p>
---	---

сеп –  $10^{-22}$  Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup>.

большой по величине пик и становится максимумом цикла;

– более узкую зону пятнообразования по широте  $\pm 35^\circ$ ;

– большее количество беспятенных дней вокруг фазы минимума (797 сут);

– значимо меньшее число групп пятен с площадями  $\geq 1000$  миллионных долей полусферы (мдп) – во всех циклах первой эпохи за пять циклов всего 135, <http://users.telenet.be/j.janssens/Archives/gsr2.pdf>;

– меньшее значение средней сглаженной за эпоху площади групп пятен  $\sim 1200$  мдп, <http://users.telenet.be/j.janssens/SC24web/SC24.html#Area>;

– затянутые фазы минимума между циклами (63 мес) и особенно перед низкими циклами, а в двух случаях из трех (СЦ23–24 и 14–15) – самые протяженные фазы минимума;

– меньшее максимальное значение полярного магнитного поля  $\pm 100$  мкТл (по СЦ24), <http://www.leif.org/research/Solar%20Mean%20Field%202003-now.png>.

Цель данной статьи – рассмотреть основные характеристики и ход развития прошедшего СЦ24 как начального цикла второй эпохи пониженной СА, показать общие черты и его особенности в сравнении с низкими СЦ первой такой эпохи и СЦ эры космических исследований Солнца.

## 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОСОБЕННОСТИ 24 ЦИКЛА СА

Начальный цикл второй эпохи пониженной СА начался в январе 2009 г. со значения  $W_{\min}^*$  1.7 (2.2 в системе V2), с максимумом  $W_{\max}^* = 81.9$  (116.4) в апреле 2014 г. и окончился в декабре 2019 г. на еще меньшем значении  $W_{\min}^* = 1.3$  (1.8), что является рекордом для всех достоверных СЦ. Ход его развития показывает, что это типичный представитель СЦ низкой величины, заметно расширяющий наши представления о граничных параметрах этого семейства. После первого пика уже в феврале 2012 г. последовал небольшой, но про-

должительный (15 мес.) спад в числах Вольфа, а уже с апреля 2013 г. СЦ24 стал уверенно расти и к апрелю 2014 г. достиг своего максимума. Продолжительность ветви роста, таким образом, составила 5.32 г., самая длительная для СЦ эпохи пониженной СА, а ветвь спада по длительности немного уступила СЦ16 (табл. 1). На рис. 2 (в значениях  $W^*$  системы V2) показан ход развития СЦ эпохи пониженной СА, из которой видно, что кривая развития СЦ24 практически полностью совпадает с СЦ12 – начальным циклом первой эпохи пониженной СА. В результате “перекалибровки” – перехода к системе V2 – СЦ12 стал немного выше СЦ24, хотя в табл. 1 его величина меньше. Основные эволюционные параметры СЦ24 приведены в табл. 2.

Рассмотрим особенности и основные характеристики прошедшего 24 цикла СА по сравнению с низкими СЦ эпохи пониженной СА и СЦ эры космических исследований.

### На Солнце

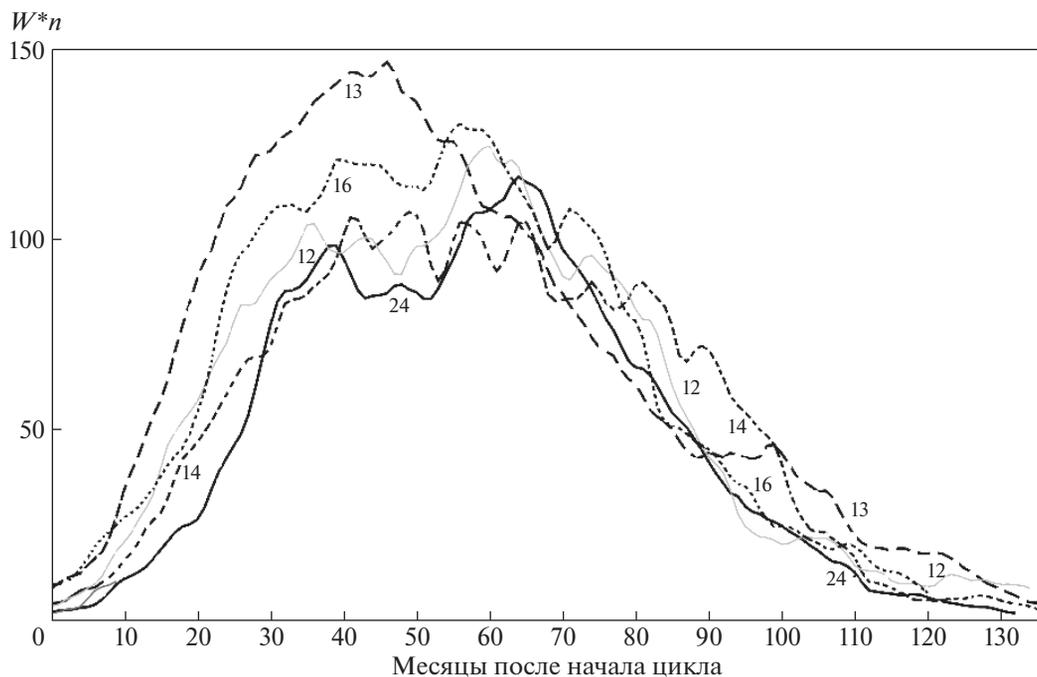
– первая группа пятен появилась в Северном полушарии в январе, а в Южном – только в мае 2009 г. Это второй случай (СЦ23), когда первая устойчивая группа пятен появляется в момент начала цикла (обычно за 1–1.5 г. до точки минимума по данным, когда измерения магнитного поля солнечных структур стали служебными, реально с СЦ17) [3];

– рекордно затянутая ветвь роста (5.3 г.), до этого рекорд держал СЦ12 (5.0 г.);

– появление первой большой ( $S_p \geq 500$  мдп) группы солнечных пятен – февраль 2011 г., а первой очень большой ( $S_p \geq 1500$  мдп) – ноябрь 2011 г. (всего за цикл 5) и единственной гигантской ( $S_p \geq 2500$  мдп) – октябрь 2014 г. (табл. 3);

– средняя продолжительность жизни групп пятен, среднее число пятен в группе, средний размер отдельно взятой группы, а также среднее число регистрируемых отдельных пятен и групп пятен являются наименьшими среди СЦ космической эры; СЦ24 – лидер по количеству групп-однодневок и пятен-одиночек [4];

– наименьшее количество больших ( $S_p \geq 1000$  мдп) и очень больших ( $S_p \geq 1500$  мдп)



**Рис. 2.** Развитие СЦ 24 в сравнении с низкими (12 – серый, 14, 16) и средним (13) СЦ в сглаженных относительных числах пятен ( $W_n^*$  – в новой системе V2).

групп пятен не только среди всех СЦ космической эры, но и всех СЦ первой эпохи пониженной СА: 16 больших, из них 5 очень больших и 1 –

экстремальных размеров ( $S_p \geq 2500$  мдп), против 23/10/2 в СЦ12, 37/9/2 в СЦ13, 21/7/2 в СЦ14, 21/7/2 в СЦ15 и 33/10/3 в СЦ16;

**Таблица 3.** Наибольшие по площади группы пятен ( $S_p \geq 1000$  мдп) текущего 24 цикла СА

№	Г М	АО	Гелиодолгота	Гелиоширота	Площадь, мдп	XRI
<b>1</b>	<b>2014 10</b>	<b>12192</b>	<b>248°</b>	<b>S13</b>	<b>2740</b>	<b>20.32</b>
2	2014 01	11967	113°	S13	1580	6.68
3	2014 01	11944	099°	S09	1560	3.18
4	2011 11	11339	102°	N19	1540	3.75
5	2012 07	11520	085°	S16	1460	2.82
6	2011 09	11302	282°	N12	1300	8.14
<b>7</b>	<b>2012 03</b>	<b>11429</b>	<b>300°</b>	<b>N18</b>	<b>1270</b>	<b>10.62</b>
8	2015 08	12403	192°	S14	1190	2.14
9	2015 06	12371	302°	N12	1180	2.00
10	2013 01	11654	148°	N08	1100	0.22
11	2014 11	12209	251°	S15	1100	1.26
12	2014 12	12242	239°	S18	1080	3.33
<b>13</b>	<b>2017 09</b>	<b>12673</b>	<b>119°</b>	<b>S08</b>	<b>1060</b>	<b>18.97</b>
14	2012 05	11476	183°	N11	1050	4.57
15	2013 04	11726	327°	N13	1000	0.1
16						

АО – номер активной области в системе Службы Солнца (NOAA); XRI – вспышечный индекс АО: сумма всех значимых вспышек (баллы X и M), где вспышки балла X дают единицы, а вспышки балла M дают десятые доли, введен Макинтошем в восьмидесятые годы прошлого столетия. Жирным курсивом выделены наиболее вспышечно-активные большие группы пятен.

– ни в одном СЦ первой эпохи пониженной СА первый пик не проявлялся так четко и с такой разницей в пиковых значениях ( $\Delta W^* \sim 15$ ), а с учетом спада после первого пика промежуточный участок роста занял интервал  $\Delta W^* \sim 30$ ;

– асимметрия появления групп пятен по полушариям Солнца проявилась следующим образом: до середины 2013 г. наблюдалось преобладание пятнообразовательной активности Северного полушария Солнца, и первый значимый пик  $W^*$  приходится на октябрь 2011 г. ( $Rn^*_{\max} = 45.5$ ), затем картина резко меняется и группы пятен чаще появляются в Южном полушарии с максимумом в апреле 2014 г. ( $Rs^*_{\max} = 59.0$ ). Однако с самого начала 2016 г. опять наблюдается устойчивое преобладание групп пятен Северного полушария Солнца (<http://users.telenet.be/j.janssens/SC24web/SC24.html#Hemarea>);

– сглаженные значения потока радиоизлучения на длине волны 10 см (2695 МГц) в июле 2008 г. – феврале 2009 г. (начало СЦ24) оставались на уровне  $F^*_{10.7} = 68 \times 10^{-22}$  Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup>; это наибольший временной интервал самых низких значений за всю историю радионаблюдений Солнца (с 1947 г.), а значение  $F^*_{10.7}$  в максимуме СЦ24 стало самым низким со времени начала этих наблюдений (с 1947 г.) –  $145.5 \times 10^{-22}$  Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup> (<http://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-6-mavg-en.php>);

– по данным спутника VIRGO уровень солнечной постоянной с 2007 по 2010 г. держался на самом низком значении за все время внеатмосферных измерений [5]; величина полного излучения Солнца на 1 а.е. более чем на 0.2 Вт м<sup>-2</sup> ниже, чем в течение солнечного минимума в 1996 г.;

– сложная картина переполусовки общего магнитного поля Солнца в фазе максимума цикла: в Северном полушарии процесс переполусовки занял ~3 г. (май 2012 – июнь 2015 г.); переполусовка в Южном полушарии прошла в более сжатые сроки, с середины 2013 г. до марта 2014 г., таким образом, полный период переполусовки занял более трех лет, что является рекордом по длительности процесса для СЦ космической эры (<http://www.leif.org/research/WSO-Polar-Fields-since-2003.png>);

– значимое уменьшение значений среднего (общего) магнитного поля: величина среднего магнитного поля была около 7–8 Гс в фазах минимумов предыдущих 3 циклов и только 4–5 Гс к началу (2008–2009) и к концу цикла (2019) (<http://www.leif.org/research/Solar%20Mean%20Field%202003-now.png>).

Это вызвало уменьшение величины магнитного поля всех активных явлений и структур в солнечной атмосфере, следствием которого стало:

– значительное уменьшение величины магнитного поля в тенях пятен (~ на 700 Гс от уровня 1998 г.), которое стабилизировалось на уровне ~2050 Гс к началу 2010 г. и продолжало держаться в ходе развития цикла [6];

– заметное уменьшение величины магнитного поля корональных дыр до значений 0.2–8.7 Гс (в среднем  $3.0 \pm 1.6$  Гс [7]) в фазе максимума, а в минимуме до значений 0.6–1.7 Гс [7, 8], по сравнению с предыдущими СЦ21–23, в фазах максимума которых соответствующие величины были (3–36 Гс) и ~20 Гс по [9], а в фазах минимума – 1–7 Гс, (со средним ~5 Гс); это с большой вероятностью ослабило геоэффективность их высокоскоростных потоков СЦ24 [10]; в период минимума СЦ24 площадь корональных дыр была максимальной, а напряженность и поток магнитного поля оказались минимальными за весь период наблюдений корональных дыр [11];

– темп развития и уровень вспышечной активности в СЦ24 существенно ниже пяти предыдущих СЦ эпохи повышенной СА (СЦ18–22) и переходного СЦ23: вспышечных событий среднего балла (рентгеновский класс M1–4.9) произошло 643, большого балла ( $M \geq 5$ ) – 162, среди которых с классом  $< X1 - 100$ , с классом  $X \geq 1.0 - 47$ , из которых 4 – класса  $X > 5$ , а очень больших и экстремальных не было совсем (табл. 4);

– количество корональных выбросов вещества увеличилось за счет падения величины магнитного поля в активных областях, что, по мнению автора, облегчило их выход в межпланетное пространство; их угловая ширина заметно увеличилась по сравнению с СЦ23 для событий одинаковой скорости распространения [12].

Важно отметить, что в СЦ24 уменьшилось время между первыми признаками появления значимого нового магнитного потока и началом периода вспышечного энерговыделения (10–20 час), хотя сам период изменений не претерпел – ~55 ч [13], что привело к появлению вспышечно-активных областей, в которых большие вспышечные события наступали непосредственно в день начала всплывания нового магнитного потока (например активные области AR11121, AR11158, AR11598). Этот факт потребовал перестройки оперативного прогноза периода реализации больших солнечных вспышек для наступившей эпохи пониженной СА. В прошедших СЦ космической эры этот временной интервал составлял не меньше 24 ч.

#### *В межпланетной среде*

– значительное уменьшение всех средних параметров солнечного ветра по сравнению со средними показателями в эпоху повышенной СА: скорости солнечного ветра и отношения теплового и магнитного давлений ( $\beta$ ) (~11%), температуры (~40%), теплового давления (~55%), массово-

**Таблица 4.** Наиболее интенсивные ( $\geq X2$ ) вспышки СЦ24

Место	Г/М/Д	Балл	КВВ	Локализация	АО	Pr (pfu)	МБ
1*	2017 09 06	X9.3, X2.2 – R3	Н	S07W33L119	12673	844–S2	G4
2	2017 09 10	X8.2 – R3	Н	S08W90L119	12673	1490–S3	G2
3	2011 08 09	X6.9 – R3	Н	S19W83L286	11263	26–S1	
4	2012 03 07	X5.4 – R3	Н	N33W66L248	11429	6530–S3	G3
5	2013 11 05	X3.3 – R3	pH	N30E70L248	11890	~1–S0	
6	2013 05 14	X3.2 – R3	Н	N12E77L292	11748	1–S0	
7	2014 10 24	X3.1 – R3		S16W21L252	12192		
8	2013 05 13	X2.8 – R3	Н	N14E85L292	11748		
9	2015 05 05	X2.7 – R3	Н	N19W90L152	12339		
10	2013 10 29	X2.3 – R3	Н	S15W85L027	11875	5–S0	
11	2011 02 15	X2.2 – R3	Н	N15E09L010	11158	2–S0	G1
12*	2017 09 06	X2.2 – R3	Н	S07W33L119	12673	9–S0	G3
13	2011 09 06	X2.1 – R3	Н	S16E08L286	11283		G4
14	2013 10 25	X2.1 – R3	Н	S06E89L293	11882		
15	2015 03 11	X2.1 – R3	pH	N33E71L196	12297	26–S1	

АО – активная область по нумерации Службы состояния околоземного космического пространства США; КВВ – тип коронального выброса вещества: Н – “гало”, pH – “частичное гало”; \* – два рентгеновских всплеска во время одной большой вспышки. Pr (pfu) – поток протонов в максимуме события в  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ст}^{-1}$  (pfu – proton flux unit) и его интенсивность по шкале воздействий S. МБ – класс магнитной бури по шкале воздействий G.

го потока (~34%), потока импульса или динамического давления (~41%), потока энергии (~48%), величины межпланетного магнитного поля (~31%) и его радиальной составляющей (~38%), протонного динамического давления – оно остается вблизи самых низких значений, наблюдаемых в космической эре: ~1.4 нПа, по сравнению с середины 1970-х до середины 1990-х годов – ~2.4 нПа [14];

– падение величины межпланетного магнитного поля привело к значительному росту (до 20% по [15]) фоновых значений галактических космических лучей и, соответственно, повышению радиационного фона вне магнитосферы Земли на всем протяжении цикла, а не только в фазах минимума. Динамику изменения интенсивности (в величине счета нейтронного монитора) галактических космических лучей в сравнении с СЦ космической эры по данным нейтронного монитора Оулу можно постоянно отслеживать на странице <https://cosmicrays.oulu.fi/>. Повышение радиационной опасности обеспечивается ростом фона ГКЛ, который достиг минимума к середине 2015 г. и начал уверенно расти, почти достигнув рекордных значений 2009 г. в конце 2019 г.

#### *В околоземном космическом пространстве (ОКП)*

Электромагнитные, корпускулярные и плазменные возмущения от солнечных геоэффективных явлений через солнечный ветер распространяются в гелиосфере, воздействуют на магнитосферы планет, их спутников, комет и вызывают

значительные отклонения от фонового, спокойного состояния практически всех слоев атмосфер рассматриваемых объектов. Агентами, вызывающими эти возмущения, являются:

– корональные выбросы вещества, являющиеся следствием активных взрывных процессов во вспышечных событиях;

– высокоскоростные потоки солнечной плазмы, следующие за ударной волной от вспышечных событий или выходящие из областей с открытой конфигурацией магнитного поля – корональных дыр.

Заметное уменьшение количества и мощности активных явлений на Солнце и, соответственно, фоновых и средних характеристик структур солнечного ветра привело к значительным изменениям состояния и реакции на воздействие всех составляющих ОКП.

Полная цепочка возмущений от отдельного большого вспышечного события представляет собой три отдельных этапа воздействия, которые последовательно реализуются в ОКП и оцениваются в пятибалльной шкале оценки интенсивности в максимуме события (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>). Сначала, в момент развития геоэффективного вспышечного события, ОКП облучается потоком электромагнитного излучения (R1–5: электромагнитный удар, оценка по рентгеновскому классу вспышечного события). Затем через временной промежуток от нескольких минут до 10 ч (в зависимости от энергии и ло-

**Таблица 5.** Наиболее значимые СПС текущего 24 цикла СА (G2–G3) по [18]

№	Солнечное протонное событие			Источник: BCB, KBB				
	$T_0$ , г м д/час	$T_{\text{макс}}$ , д/час	Pr (pfu)	$T_0$ , д/UT	Класс вспышки	KBB	Координаты на Солнце	АО
1	20120307/02	08/13	4340	07/0000	X5.4	H	N17E27	11429
2	20120123/04	24/17	3900	23/0338	M8.7	H	N28W21	11402
3	20130522/13	23/05	1480	22/1235	M5.0	H	N15W70	11745
4	20140107/18	08/12	1000	07/1804	X1.2	pH	S15W11	11944
5*	20170910/16	10/22	953	10/1535	X8.2	H	S08W88	12673
6	20120127/18	28/02	740	27/1737	X1.7	H	N27W71	11402
7	20150621/16	22/19	600	21/0236	M2.0, M2.6	H	N12E13	12371
8	20170907/20	08/00	575	07/1420	X1.3	H	S11W49	12673
9	20120313/17	13/21	390	13/1635	M7.9	H	N18W62	11429
10	20170906/11	07/04	334	06/0852	X2.2, X9.2	H	S07W33	12673
11*	20120517/01	17/04	180	17/0125	M5.1	pH	N11W76	11476
12	20170904/21	05/19	167	04/1805	M5.5	H	S11W16	12673
13	20120717/15	18/06	116	17/1203	M1.7	pH	S28W65	11520
14	20130930/00	30/17	102	29/2259	C1.2/BCB		N15W40	
15	20130411/07	11/17	100	11/0655	M6.5	H	N09E12	11719

\* – GLE-событие; Pr – поток протонов с энергией  $E \geq 10$  МэВ в максимуме события в pfu ( $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ст}^{-1}$ ) по [18]; UT – всемирное время по Гринвичу; BCB – выброс солнечного волокна; H – KBB типа “гало”; pH – KBB типа “частичное гало”.

кализации источника на Солнце) в ОКП приходят потоки солнечных заряженных частиц (S1–5: корпускулярный удар – солнечное протонное событие, оценка по максимальной интенсивности потока солнечных протонов с  $E \geq 10$  МэВ). Наконец, через 17–96 ч в ОКП приходят потоки плазмы повышенной скорости, плотности и температуры (G1–5: плазменный удар, оценка по наибольшему значению геомагнитного Kp-индекса), вызывая возмущения в геомагнитном поле – магнитные бури. Заметим, что возмущения от выбросов солнечных волокон и высокоскоростные потоки из корональных дыр вызывают в ОКП только магнитные возмущения до малых магнитных бурь (G1), за исключением отдельных случаев взаимодействия в межпланетной среде возмущений двух и более источников.

Воздействие вспышечного электромагнитного излучения на ионосферу в СЦ24 оказалось значительно меньше, что определило и пониженные значения полного электронного содержания [16], и снижение критической частоты слоя foF2, и изменения других общих характеристик ионосферы. Спорадический нагрев земной атмосферы значимо уменьшился, что привело к еще большему загрязнению ОКП (неблагоприятный режим очистки низких орбит от космического мусора), и удлинению срока жизни космических аппаратов. Хорошей иллюстрацией этого явилось падение китайской орбитальной станции, запущенной в

сентябре 2011 г. В марте 2016 г. у станции отказала телеметрия, и расчеты, основанные на средних (за циклы эпохи повышенной СА) изменениях параметров атмосферы, показали, что она войдет в плотные слои и упадет на Землю в конце 2017 г. Однако низкая вспышечная активность продлила этот срок до апреля 2018 г.

Повышение радиационной опасности внутри магнитосферы обеспечивается ростом фона галактических космических лучей, который достиг минимума к середине 2015 г. и начал уверенно расти, приближаясь к рекордным значениям 2009 г., что, несмотря на падение уровня вспышечной активности, явилось причиной повышения радиационного фона в стратосфере на 18% (внешний радиационный пояс). В то же время на высотах полетов гражданской авиации фон практически не повысился (<https://spaceweatherarchive.com/2019/12/>).

Величина фона высокоэнергичных частиц в спокойное время в рассматриваемом цикле менялась от значений  $7 \times 10^{-4} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{МэВ}^{-1}$  вблизи минимума текущего цикла 2009–2010 гг. до значений  $3.5 \times 10^{-4} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{МэВ}^{-1}$  в конце 2013 г. вблизи максимума цикла, тогда как в 23-м цикле этот параметр менялся от значений  $5 \times 10^{-4} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{МэВ}^{-1}$  вблизи минимума 1996–1997 гг. до значений  $3 \times 10^{-4} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{МэВ}^{-1}$  в 2001–2003 гг. вблизи максимума цикла [17].

Таблица 6. Наиболее значимые магнитные бури текущего 24 цикла СА

R	Магнитные бури						класс	Источник		
	$T_0$ , г м д/час	SSC, д/UT	$\Delta T$ , час	$Ap_{MB}$ , нТл	$Aa_{MB}$ , нТл	$Dst_{min}$ , нТл		$T_{max}$ , д/м/UT	Событие, балл	КВВ, UT/V км/с/da
1	201503/17	17/0445	60	108	146	-223	G4	15.03/0115	C9.1	0148/719 Н
2	201709/08	07/2300	27	106	111	-142	G4	06.09/1153	X9.3	1224/1497 Н
3	201203/09	08/1103	33	87	87	-145	G4	07.03/0002	X5.4	0024/2684 Н
4	201207/15	14/1809	48	78	87	-139	G3	12.07/1537	X1.4	1624/0657 Н
5	201510/06		60	74	94	-124	G3	03.10	КД + ВСВ	
6	201506/22	22/1833	51	72	86	-204	G4	18.06/1736	M3.0 + КД	1724/1305 Н
7	201303/17	17/0600	18	72	81	-132	G3	15.03/0546	M1.1	0712/1063 Н
8	201605/08	08/0108	30	70	95	-083	G2	05.05	КД + СГ + ВКВ	
9	201512/19	20/1616	42	70	98	-155	G3	16.12	ВСВ/С6.6	1424/0503 Н
10	201808/25	25/18	27	63	85	-174	G3	20.08	ВСВ	2124/0363 рН
11	201509/11		33	60	84	-081	G3	07.09	КД + ВСВ	1000/0337 рН
12	201310/02	02/0155	12	58	75	-072	G4	29.10/2143	X2.3/ВСВ	2200/1001 Н
13	201610/24	25/0922	57	57	81	-060	G2	20.10	ВСВ + КД	
14	201004/05	05/0826	45	55	62	-081	G4	03.04	ВСВ	1034/0668 Н
15	201508/26		45	52	61	-080	G2	24.08/0726	M5.6	0848/0272 рН
16	201306/28		33	50	67	-102	G2	25.06	КД + ВСВ	2200/1139 <90°
17	201305/31	31/1618	33	49	65	-124	G3	27.05	ВСВ + КД	1924/0528 рН
18	201509/07			24	74	-99	G2	05.09	КД + ВСВ	

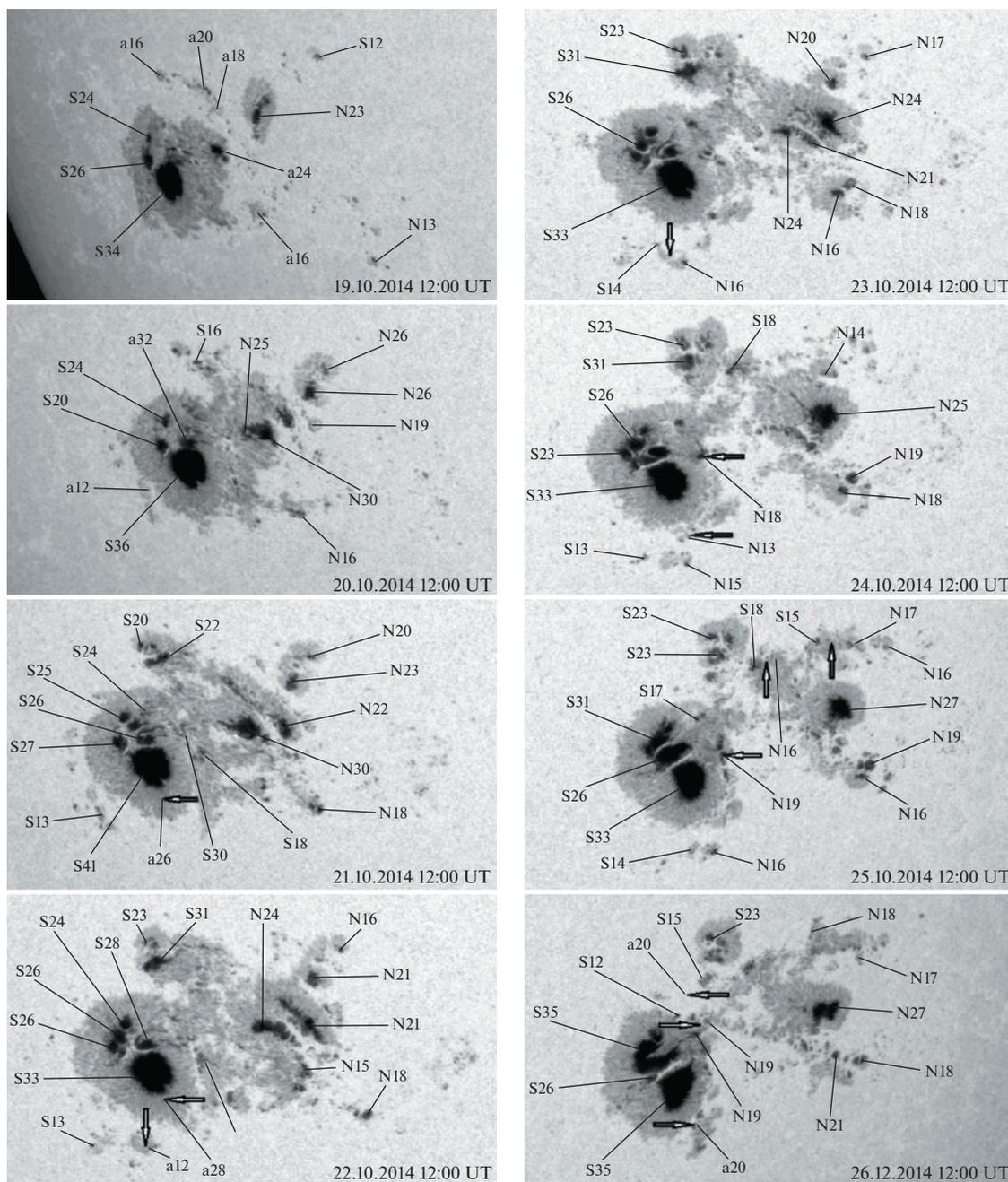
SSC – внезапное начало магнитной бури;  $Ap_{MB}$ ,  $Aa_{MB}$  – среднее за время магнитной бури значение геомагнитных индексов;  $Dst_{min}$  – минимальное значение в нТл; UT – всемирное время по Гринвичу; событие – вспышка, выброс солнечного волокна (ВСВ), корональная дыра (КД);  $T_{max}$  – момент максимума излучения вспышечного события (в данном случае рентгеновского всплеска); рентгеновский класс вспышечного события в диапазоне (1–12.5 кэВ); КВВ – корональный выброс вещества: время первого появления/начальная скорость/ da – угловая ширина: Н – “гало”, рН – “частичное гало”.

Количество солнечных протонных событий ( $E_{pr} > 10$  МэВ) значительно снизилось [18]: 96 против 149 в СЦ23, 127 в СЦ22, 146 в СЦ21 и 144 в СЦ20, особенно умеренных (S2) – 11 – и больших (S3) – 4. Очень больших (S4) не наблюдалось; количество возрастных на нейтронных мониторах (вспышки в космических лучах – GLE-события) катастрофически упало – всего 2 (табл. 5). Полный флюэнс протонов  $> 10$  MeV в течение первых 2100 дней 23-м цикле СА в 4.4 выше, чем за такой же период 24-го цикла [19]. Рисунок 5 представляет солнечное протонное событие от мощных вспышек сентября 2017 г.

Геомагнитный Ap-индекс достиг минимума в октябре 2009 г., спустя 10 мес. после минимума СЦ23 в числах Вольфа. Максимум среднемесячных значений Ap-индекса в СЦ24 отмечен в сентябре 2017 г. (18.1), с промежуточными пиками в марте 2015 г. (16.3), марте 2012 г. (16.1) и в сентябре 2015 г. (15.8). В июне 2015 г. сглаженное значение  $Ap^*$ -индекса впервые в цикле превысило 10 (<http://legacy-www.swpc.noaa.gov/ftplib/weekly/Ap.gif>).

Значительное снижение числа вспышечных событий привело к уменьшению числа обычно более сильных спорадических геомагнитных возмущений, что может быть объяснено сильно упавшей геоэффективностью корональных выбросов вещества, угловая ширина которых для событий одинаковой скорости распространения, по сравнению с СЦ23, заметно увеличилась [12]. Уменьшение числа рекуррентных малых магнитных бурь, связанных с высокоскоростными потоками корональных дыр, вероятно, можно объяснить, во-первых, заметным уменьшением величины магнитного поля в корональных дырах, что сказалось на характеристиках связанных с ними высокоскоростных потоков, во-вторых, изменением практически всех параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля и, как следствие, характеристик магнитосферы. Соответственно, сильно выросло число периодов спокойных геомагнитных условий.

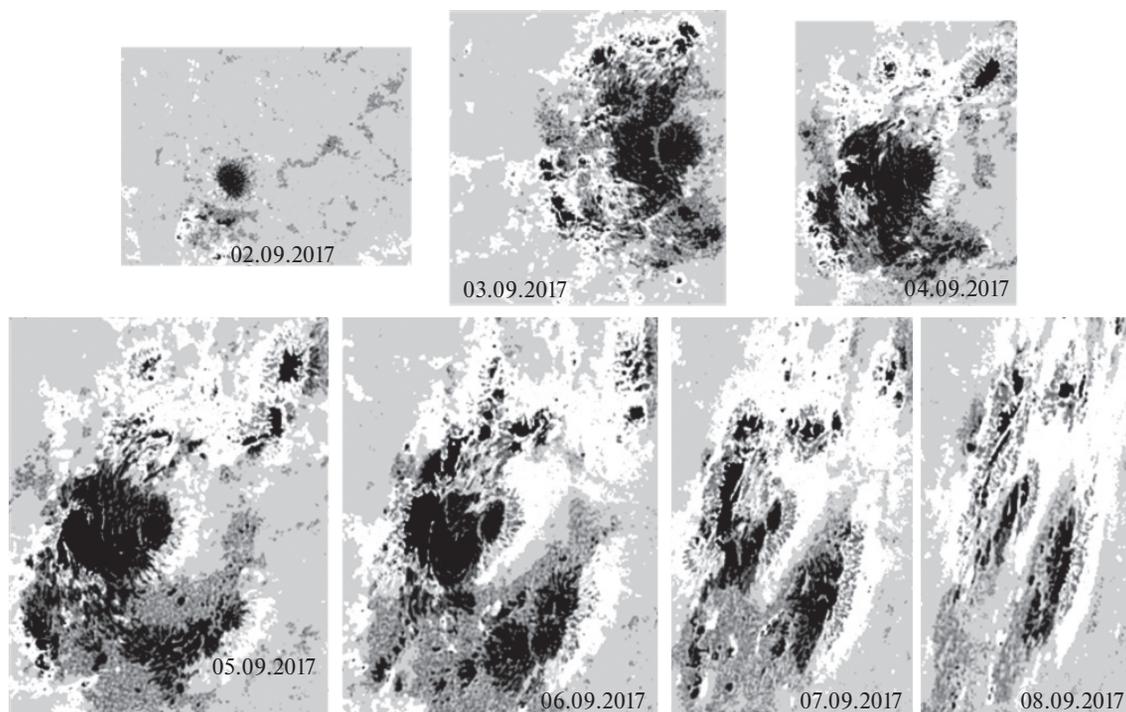
В табл. 6 приводятся сведения об умеренных ( $41 < Ap < 69$ ), больших ( $70 < Ap < 99$ ) и очень больших ( $Ap > 100$ ) магнитных бурях в системе геомагнитного Ap-индекса и соответствующих



**Рис. 3.** Вид и динамика развития гигантской группы солнечных пятен 19–26.10.2014 г. из [22]. Указаны напряженности магнитных полей в пятнах (в сотнях Гс) по данным обсерваторий Маунт-Вилсон и Крымской астрофизической обсерватории. Стрелками указаны области выхода новых потоков. Линия раздела полярностей проходит по центральной области группы слева направо по диагонали. Север сверху.

этим бурям максимальным значениям геомагнитных индексов Aa и Dst; об активных явлениях на Солнце, источниках этих магнитных бурь. В целом геоэффективность солнечных вспышечных явлений и корональных дыр весь цикл оставалась аномально низкой: за 11 лет развития цикла по геомагнитному индексу Ap зарегистрированы только две очень большие магнитные бури и семь больших магнитных бурь.

Сравнение количества магнитных бурь в первых СЦ эпох пониженной СА СЦ12 и СЦ24, которое можно провести только в системе геомагнитного индекса Aa, привело к достаточно неожиданному результату: если число магнитных бурь класса G1 практически не изменилось (78 против 71), то число спорадических магнитных возмущений значительно различается – магнитных бурь класса G2 было 43/24, G3 – 11/3,



**Рис. 4.** Вид группы пятен AR12673 и динамика ее развития по наблюдениям космической солнечной обсерватории SDO в непрерывном спектре (4500 Å) с наложенным магнитным полем (белое “+” полярность) за 2–8.09.2017 г. Преобразованный рисунок из <http://www.solen.info/solar/>.

G4 – 3/3 и G5 – 3/0 [20]. Таким образом, экстремальных магнитных бурь в СЦ24 класса G5 не было, что напрямую указывает на то, что в первую эпоху пониженной СА фоновые значения общего магнитного поля были выше, и вследствие этого должны быть выше и значения магнитных полей вспышечных активных областей [20].

Остановимся кратко на характеристиках и особенностях развития наиболее вспышечно-активных групп пятен текущего цикла СА (по выбору автора). В данной статье для характеристики группы пятен (AR) используется ее порядковый номер в системе Службы Солнца NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) США, гелиокоординаты AR, время прохождения центрального меридиана (СМР), максимальная площадь группы (Sp в мдп) и вспышечный потенциал AR, который включает:

– вспышечный индекс XRI (X-ray region index) группы пятен, введенный П. Мак-Интошем, который рассчитывается по сумме вспышечных событий рентгеновских классов X ( $10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>) и M ( $10^{-5}$  Вт/м<sup>2</sup>), где вспышки класса X дают единицы, а вспышки класса M дают десятые доли. Наибольший индекс XRI за все время наблюдения Солнца в данном диапазоне электромагнитного излучения (с 1970 г.) получили три группы пятен: AR6659 июня 1991 г. (>86.5), AR 10486 октября 2003 г. (>62.56) и AR5395 марта 1989 г. (>55.5).

Знак больше (>) означает, что в данной активной области осуществились вспышечные события, чей рентгеновский класс (X) превышал верхний порог насыщения фотометра, измерявший поток мягкого рентгеновского излучения на космическом аппарате, что заперло на некоторое время прибор.

– количество солнечных вспышек по рентгеновским классам X и M, где нижний индекс дает количество вспышек данного класса, а верхний индекс дает рентгеновский класс самой большой вспышки серии данного класса.

Первые большие вспышечные события осуществились уже в феврале 2010 г. Сначала в AR11045 (N24L253; СМР 17,9.02.2010, Sp = 420 мдп, XRI = 1.52; M86.4 + C24), которая появилась в центральной области Солнца 6.02 и сразу же, в процессе всплытия, стала производить вспышки среднего класса (M < 5), которых за 48 ч 7–8.02 осуществилось 7 и одна большая (M6.4).

11 февраля 2011 г. на видимом диске Солнца образовалась AR11158 (S19L034, СМР 13,8.02.2011, Sp = 620 мдп; XRI = 3.59; X12.2 + M66.6). Скорость всплытия последовательных магнитных потоков была столь велика, что уже 15.02 площадь группы пятен стала большой (Sp ≥ 500 мдп), а магнитная конфигурация центральной части стала предельно усложненной, что привело к периоду вспышечного энерговыделе-

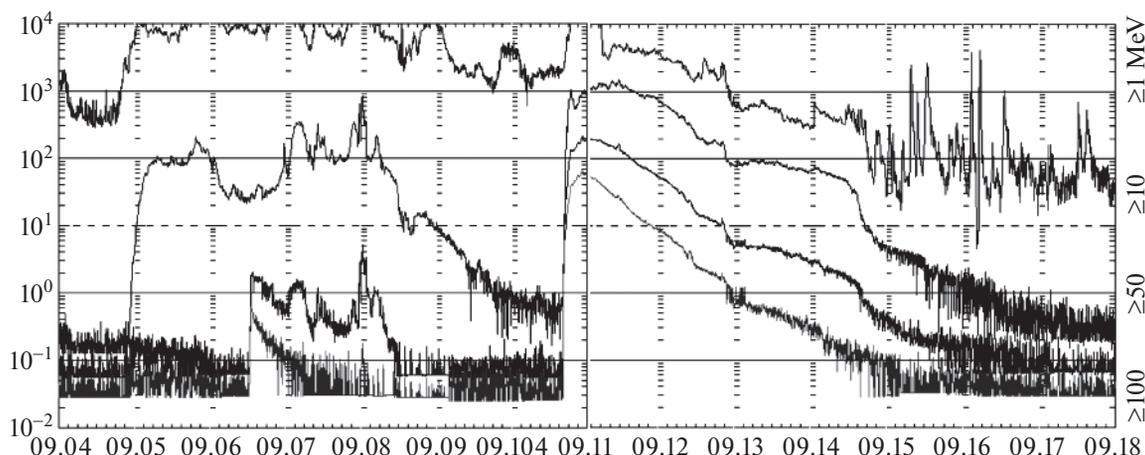
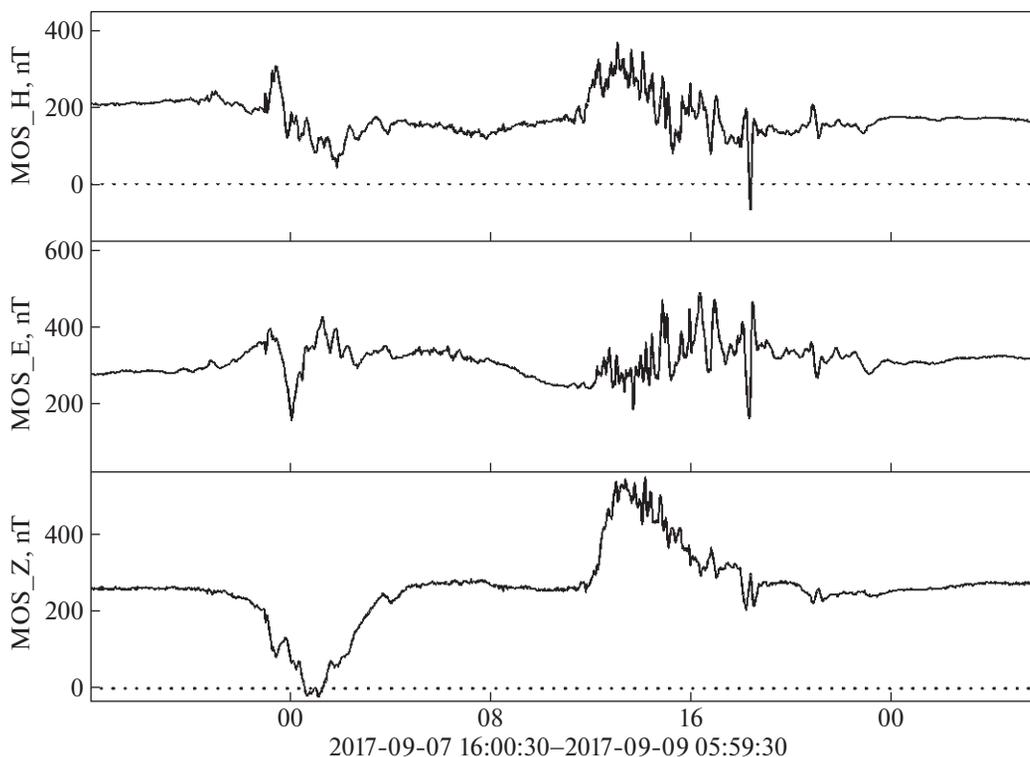


Рис. 5. Поток солнечных высокоэнергичных протонов ( $\text{pfu} = \text{ч}/\text{см}^2 \text{ с ср}$ ) в сентябре 2011 г. от больших солнечных вспышек в AR12673 по данным геостационарного спутника GOES-11 (<http://www.swpc.noaa.gov>).

ния: 13.02 в группе пятен произошла первая большая ( $M \geq 5$ ) вспышка класса M6.6, а 15.02 — первая в текущем цикле вспышка класса X2.2. Всего же за 69 ч 13–16.02 в активной области реализовались три больших и пять вспышек средних баллов. Последняя большая вспышка (M6.6) осуществилась 18.02. AR11261 (N16L330, SMP 01,4.08.2011, Sp = 390 мдп; XRI = 2.71; M59.3 + C36) вышла на видимый диск 25.07 группой пятен среднего размера, но всплытие нового магнитного потока 2.08 привело к осуществлению 3–4.08 двух больших вспышек классов M6.0 и M9.3, возмущения от которых вызвали в ОКП солнечное протонное событие 4–6.08 и умеренную магнитную бурю 5–7.08. Вторая группа пятен AR11263 (N17L301, SMP 03,5.08.2011, Sp = 720 мдп, XRI = 7.67, X16.9 + M3 + C33) к 7.08 выросла в категорию большой и 8–9 августа за 13 ч выдала одно из самых мощных вспышечных событий СЦ24 — вспышку класса X6.9 — и две вспышки среднего балла. В ОКП эти вспышечные события вызвали два малых протонных события. В сентябре 2011 г. период осуществления больших солнечных вспышек связан с AR11283 (N12L224, SMP 05, 7.09.2011 Sp = 230 мдп; XRI = 5.60; X22.1 + M5 + C13). Новый всплывающий магнитный поток 4.09 привел к тому, что 6–8.09 за 61 ч осуществились четыре значимые вспышки, в том числе две — класса X2.1 (6.11) и X1.8 (7.11). КВВ от этих солнечных вспышек вызвали в ОКП умеренную магнитную бурю 9–10.09, начавшуюся с прихода двойной межпланетной ударной волны, отразившейся в двух последовательных внезапных импульсах геомагнитного поля 9.09 — SI/1243UT и SI/1250 UT. 21 сентября на видимый диск вышла группа пятен AR11302 (N13L280, SMP 28, 7.09.2011, Sp = 1300 мдп; XRI = 8.73; X21.9 + M177.4 + C32) и уже 22–25.09 прямо у восточного лимба за 66 ч за-

регистрировано пять больших вспышек — X1.4 (22.9), X1.9, M7.1 и M5.4 (24.9), M7.4 (25.09), — которые, тем не менее, вызвали в ОКП малое протонное событие и умеренную магнитную бурю.

В появившемся из-за восточного лимба 13 января 2012 г. долготном комплексе активных областей, образованного двумя группами пятен AR11401 (N15L212, SMP 21,0.01.2012, Sp = 540 мдп; XRI = 0.37; M31.7 + C19) и AR11402 (N28L211, SMP 21,2.01.2012, Sp = 630 мдп; XRI = 2.89; X11.7 + M28.7 + C9), 19.01 осуществилась очень длительная по времени (>6 ч) вспышка M3.2, которая вызвала в ОКП малую магнитную бурю 22.01 и протонное событие малой интенсивности. Вспышки классов M8.7 23.01 и X1.7 27.01 стали источниками второго (S3 — 3900  $\text{ч}/\text{см}^2 \text{ с ср}$ ) и пятого (S2 — 740  $\text{ч}/\text{см}^2 \text{ с ср}$ ) по потоку частиц солнечных протонных событий СЦ24. Необходимо отметить, что подавляющее большинство больших и очень больших по интенсивности протонных событий происходят во время вспышек, которые осуществляются в комплексах активных областей [21], конфигурация магнитного поля которых, по-видимому, способствует обильному выходу солнечных протонов в межпланетное пространство. Следующий период очень высокой вспышечной активности в марте 2012 г. связан с комплексом активных областей, который составили AR11429 (N18L301, SMP 09, 1.03.2012, Sp = 1270 мдп; XRI = 11.92; X25.4 + M148.4 + C32), и AR11430 (N19L319, SMP 08,0.03.2012, Sp = 200 мдп; XRI = 1.3; X11.3 + C3). Первая группа пятен 5–7.03 за 46 ч произвела две большие вспышки класса X и 10 вспышек класса M. Последней была двойная вспышка X5.4 + X1.3 (7.03), которая захватила оба компонента комплекса и стала источником самого большого по потоку (S3 — 4340  $\text{ч}/\text{см}^2 \text{ с ср}$ ) протонного события СЦ24. Кроме того,



**Рис. 6.** Очень большая магнитная буря (G4) 7–8.09.2017 г. по данным геомагнитной обсерватории Москва (ИЗМИРАН). По вертикальной оси приводится развитие магнитной бури в компонентах геомагнитного поля H, E, Z.

быстрый корональный выброс вещества от этого вспыхивающего события вызвал в ОКП 7–9.03 длительную большую магнитную бурю ( $Dst = -145$  nT). В основном компоненте комплекса 9–10.03 за 38 ч осуществились две большие вспышки баллов M6.3 и M8.4. Наконец, 13.03 на W59 осуществилась большая протонная ( $S2 = 390$  ч/см<sup>2</sup> с ср) вспышка класса M7.9. В июле 2012 г. в группе пятен AR11515 (S16L205; CMP 3, 2.07.2012;  $S_p = 900$  мдп;  $XRI = 8.5$ ; X11.1 + M306.9 + C72) со 2.07 начался период осуществления больших вспышек (5), который продлился 73 ч. Эта серия вспышек вызвала в ОКП два малых (S1) протонных события 7 и 9.07 и две малых магнитных бури 9 и 10.07. В это же время 7.07, появились первые пятна AR11520 (S16L084; CMP 12, 2.07.2012;  $S_p = 1460$  мдп;  $XRI = 2.93$ ; X11.4 + M57.7 + C26). Уже на второй день ее площадь превысила 1000 мдп, а 12 июля достигла максимальных значений. Она и произвела две большие вспышки 12 (X1.4) и 19 (M7.7) июля, обе протонные (S1 и S2). Последняя серия больших вспышек в 2012 г. (M9.0, M5.0, X1.8) осуществилась за 57 ч 20–23.10 г. при выходе на видимый диск группы пятен AR11598 (S10L113; CMP 27, 1.10.12;  $S_p = 420$  мдп;  $XRI = 3.33$ ; X11.8 + M39.0 + C25).

В мае 2013 г. у восточного лимба за 57 ч 13–15.05 в группе пятен AR11748 (N12L294, CMP

20, 0.05.2013,  $S_p = 310$  мдп,  $XRI = 9.96$ ; X43.2 + M53.2 + C19) осуществилась серия из четырех больших вспышек классов X1.7, X2.8, X3.2 и X1.2. Такая концентрация вспыхивающих событий балла X достаточно редкое событие, однако эта серия вспышек вызвала в ОКП лишь малое протонное событие. Детальный анализ ситуации в этом случае невозможен, так как вся подготовка этих событий происходила за восточным лимбом. Наибольшая концентрация больших вспышек в 2013 г. наблюдалась в последней декаде октября – первой декаде ноября и связана с тремя группами пятен:

– AR11875 (N07L027, CMP 23, 1.10.2013;  $S_p = 790$  мдп;  $XRI = 6.53$ ; X22.3 + M125.1 + C57) – всплытие значимого нового магнитного потока началось 22.10 и привело к первому периоду вспышек 23–24.10 (5 вспышек средних баллов за 14 ч), вслед за которым с 26.10 следующее всплытие привело к осуществлению 28–29.10 за 44 ч двух больших вспышек баллов X1 и X2.3. Вспыхивающая активность этой группы пятен принесла в ОКП два малых протонных события.

– В AR11882 (S09L291, CMP 30, 5.10.2013,  $S_p = 390$  мдп,  $XRI = 9.96$ ; X22.1 + M114.4 + C9) обе большие вспышки (X1.7, X2.1) произошли 28.10, когда группа пятен была на видимом диске всего 2 сут., поэтому их воздействие на ОКП ограничилось только излучением, но при заходе за запад-

ный лимб Солнца вспышка среднего класса M1.8 вызвала в ОКП малое протонное событие.

– AR11890 (S10L113, CMP 8.8.11.2013;  $S_p = 950$  мдп;  $XRI = 7.38$ ; X33.3 + M53.8 + C46) – два вспышечных периода осуществились в центральной зоне. Первый (X3.3) пришелся на пик развития группы пятен 5–6.11 – одна большого и три среднего класса за 28 ч, – и основной – 4 вспышечных события (два X1.1 и два средних) – осуществился 8 – 10.11 за 48 ч.

В январе 2014 г. группа пятен AR11944 (S09L100, CMP 7.8.01.2014;  $S_p = 1560$  мдп;  $XRI = 3.08$ ; X11.2 + M77.2 + C44) появилась на диске Солнца 1.01 большой, относительно спокойной, в которой до 7.01 осуществилось всего пять вспышек средних баллов. Однако 05.01 к северо-востоку от ведущего пятна проявилось всплытие значимого нового магнитного потока и 7.01 за 8 ч осуществились две большие вспышки: первая, класса M7.2, произошла во внутреннем пространстве группы пятен, а вторая, класса X1.2 осуществилась к юго-западу от большого ведущего пятна и вызвала в ОКП третье по величине в СЦ24 большое ( $S3 = 1000$  ч/см<sup>2</sup>·с·ср) протонное событие. В последней декаде февраля практически на восточном лимбе в выходящей группе пятен AR11990 (S13L110, CMP 02.6.02.14;  $S_p = 250$  мдп;  $XRI = 5.13$ ; X14.9 + M21.2 + C6) 25.02 осуществилась 4-я по интенсивности мягкого рентгена вспышка класса X4.9, которая дала начало умеренного ( $S2 = 97$  ч/см<sup>2</sup>·с·ср) очень длительного протонного события, длившегося до 10.03. Вспышечная активность отмечена на высоком уровне 10–11.06, когда в небольшой группе пятен AR12087 (S18L156, CMP 16.2.06.2014;  $S_p = 220$  мдп;  $XRI = 6.76$ ; X32.2 + M83.9 + C29) за 22 ч осуществились три большие вспышки классов X2.2, X1.5 и X1.0.

Наиболее значительным событием СЦ24 стало прохождение по видимому диску в октябре 2014 г. гигантской, самой большой за последние 20 лет вспышечно-активной группы пятен (рис. 3) [22], большие вспышечные события в которой, кроме электромагнитного воздействия, не оказали заметного влияния на ОКП. AR12192 (S13L248, CMP 23.5.10.14,  $S_p = 2750$  мдп;  $XRI = 20.45$ , X63.1 + M358.9 + C73) вышла на видимый диск Солнца 17.10. Первая большая вспышка класса X1.1 осуществилась уже 19.10, следующая (X1.6) 22.10, а с 26 по 28.10 за 38 ч произошли 6 больших вспышек (26.10 – X2.0 и X1.0; 27.10 – M7.1, M6.7 и X2.0; 28.10 – M6.6). Главной особенностью этих больших вспышечных событий стало практически полное отсутствие значимых геоэффективных корональных выбросов вещества, из-за чего эта активная область практически не дала возмущений ни в корпускулярном излучении, ни в геомагнитном поле. Это прямо говорит о том, что

крупномасштабное магнитное поле этой гигантской группы пятен было очень сильным и его магнитная конфигурация была закрытой, представляя собой простую биполярную структуру, внутри которой по линии раздела полярностей и происходили большие вспышечные события, но, по мнению автора, выделенной во вспышках энергии было недостаточно, чтобы корональные выбросы вещества могли выйти за пределы этой структуры. Понимание этого результата может объяснить уникальную для достоверного ряда СЦ ситуацию, которая сложилась на фазе роста СЦ18, когда прохождение по видимому диску Солнца и вспышечная активность экстремальных ( $> 4000$  мдп) по площади групп пятен, наибольшая из которых в марте 1948 г. имела площадь 6140 мдп, практически не вызывало в ОКП больших магнитных возмущений.

Через 1.5 года после начала фазы минимума (апрель 2016 г.) в сентябре 2017 г., на третьем обороте в спокойной небольшой группе пятен AR12673 (S08L117, CMP 03.8.09.2017,  $S_p = 1060$  мдп,  $XRI = 18.97$ , X59.3 + M278.1 + C54) с 3.09 начали последовательно всплывать новые быстрые магнитные потоки, первый из которых уже к 4.09 увеличил площадь группы пятен почти в четыре раза, а к 8.09 она выросла до максимального значения. Как неоднократно бывало в СЦ24, менее чем через сутки после начала процесса, уже 4.09 произошло первое длительное ( $\geq 10$  ч) вспышечное событие (оптический бал 3B), включавшее в себя четыре рентгеновских всплеска среднего класса M и большой всплеск M5.5. В процессе взаимодействия новых магнитных потоков с собственным магнитным полем активной области (6–8.09) осуществились четыре больших всплеска класса X (X2.2, X9.3 – одна вспышка оптического балла 2B, X1.7 – 6.09, X1.3 – 7.09) и шесть больших всплесков класса M (рис. 4). Всплытие следующего нового магнитного потока (9–10.09) привело еще к одной большой вспышке класса X8.2 (10.09). Таким образом, в этой активной области произошли два самых мощных вспышечных события СЦ24 – X9.3 и X8.2. Этот период высокой вспышечной активности вызвал в ОКП 4 солнечных протонных события умеренной ( $S2$ ) интенсивности (рис. 5), которые продолжались с 4 по 15.09. Кроме того, возмущения от них вызвали одну очень большую ( $G4$  – рис. 6) и две малые магнитные бури. Надо отметить, что появление такой экстремально вспышечной активной области в фазе минимума СЦ (–2 года от минимума) не редкое явление. В предшествующем СЦ23 подобные высокоактивные группы пятен были отмечены в сентябре 2005 г. (–3 года) и в декабре 2006 г. (–2 года). Но этот цикл был особый, переходный между эпохами повышенной и пониженной СА, и могло сложиться впечатление, что это особенность переходных периодов. Однако и в

21-м цикле (эпоха повышенной СА) такие группы пятен наблюдались в апреле и мае 1984 г. (–2 года). Для эпохи пониженной СА у нас пока нет статистики, так как СЦ24 – первый цикл наступившей эпохи, но эта закономерность, как видим, выполняется.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закончившийся в декабре 2019 г. СЦ24, длительность которого составила полные 11 лет, впервые в полной мере дал нам возможность детально исследовать начальный цикл эпохи пониженной СА. Его ход развития и характеристики полностью вписались в характерные границы изменения средних и граничных параметров семейства низких СЦ, слегка их изменив (см. табл. 1). Он развивался по сценарию, типичному для достоверных низких СЦ, по которому наиболее мощные вспышечные события обычно происходят на фазе спада цикла и более редко на фазе роста.

Характеристики СЦ24 вместе с СЦ23 (переходный) показали, что фоновые значения общего магнитного поля Солнца, ответственные за эпохи СА, полностью определяют качество процесса пятнообразования в конвективной зоне Солнца, влияя на средние параметры, количество, темп развития и вспышечную производительность групп пятен и областей с открытым в межпланетное пространство магнитным полем – корональных дыр. Переход к эпохе пониженной СА в СЦ24 значимо изменил условия реализации солнечных вспышечных событий, образования и выхода из Солнца агентов, ответственных за распространение возмущений в перестроившейся межпланетной среде. По мере развития СЦ24 стало понятно, что

– сравнительно небольшое уменьшение (примерно вдвое) фоновых значений общего магнитного поля Солнца в СЦ24 привело к уменьшению величин магнитных полей, как средних для Солнца, так и всех без исключения активных явлений на Солнце. Эта же динамика непосредственно сказалась и на физических условиях распространения солнечной плазмы в межпланетном пространстве, понизив геоэффективность всей цепочки переноса возмущения через солнечный ветер (источник на Солнце – агенты переноса – реакция ОКП), уровень которой стал значимо меньше, по сравнению с тем, что мы наблюдали в СЦ космической эры – эпохе повышенной СА. Следствием наблюдаемого дефицита вспышечно-активных областей стало уменьшение числа сильных спорадических геомагнитных возмущений, больших протонных событий, а очень больших и экстремальных вспышечных событий не наблюдалось.

– Таким образом, согласно сценарию СА по достоверному ряду наблюдений, Солнце вступило в период осуществления малых и средних циклов, который должен продлиться первые три четверти XXI века (5 циклов – ~55 лет) – эпоху пониженной СА. Внутри эпох СА, на данной статистике, работают все наблюдательные правила и закономерности развития СЦ, нарушение правила Гневешева-Оля возможно только в переходный период, что и произошло в СЦ 22–23. Отсюда следует, что следующий СЦ25 будет циклом средней величины ( $W^* \sim 120 \pm 10$  или в системе  $V2 \rightarrow W^* \sim 145 \pm 15$ ). Исходя из наблюдательных характеристик циклов первой эпохи пониженной СА (табл. 1) и устойчивости сценария развития солнечной цикличности, можно с достаточной долей уверенности дать прогноз, что последующие четыре СЦ будут поочередно циклами средней и низкой величины.

– Сравнение количества магнитных бурь в первых СЦ эпох пониженной СА (СЦ12 и СЦ24), которое можно провести только в системе геомагнитного индекса Аа, привело к достаточно неожиданному результату: разница в количестве спорадических магнитных возмущений и, особенно, отсутствие экстремальных магнитных бурь в СЦ24 напрямую, по мнению автора, указывает на то, что в первую эпоху пониженной СА, во всяком случае в СЦ12, фоновые значения общего магнитного поля были несколько выше. Это обеспечило более благоприятные условия для осуществления геоэффективных солнечных вспышечных событий за счет мощности и/или сложности процесса энерговыделения.

– На данной статистике работающий сценарий СЦ по достоверному ряду наблюдений Солнца дает основание считать, что солнечное динамо работает в двух режимах, обеспечивающих эпохи пониженной и повышенной СА ( $\Delta T \sim 50\text{--}55$  лет – 5 СЦ), между которыми реализуются переходные периоды ( $\Delta T \sim 17$  лет ~ 1.5 СЦ), во время которых общее магнитное поле Солнца меняет режим пятнообразовательной активности к соответствующей эпохе.

– Ослабление режима выноса солнечных магнитных полей привело к значительному падению их фоновой интенсивности в межпланетном пространстве и ОКП (внешний радиационный пояс) и, соответственно, к значимому росту радиационного фона галактических космических лучей на всем протяжении цикла, а не только в эпоху минимума. Это обстоятельство закрывает возможность длительных полетов в открытом космосе и обитаемых станций на поверхности Луны с длительным сроком пребывания одной команды.

– Спорадический нагрев земной атмосферы заметно уменьшился, что привело к возросшему уровню загрязнения ОКП (неблагоприятный ре-

жим очистки низких орбит от космического мусора) и другим, возможно, неблагоприятным последствиям.

— Геоэффективность высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр заметно упала, что выразилось в некотором уменьшении числа рекуррентных, малых геомагнитных возмущений (малых магнитных бурь и суббурь), а количество периодов со спокойной и слабозамушенной геомагнитной обстановкой значительно выросло.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *В. Н. Ишков, И. Г. Шубаев*, Известия РАН. Сер. физ. **70**, 10, 1439 (2006).
2. *В. Н. Ишков*, в “Солнечная и солнечно-земная физика – 2013”, ред. Ю.А. Наговицин, Изд. ВВМ, Санкт-Петербург, 111 (2013), [http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf\\_2013/conf\\_2013.pdf](http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf_2013/conf_2013.pdf).
3. *K. L. Harvey, F. Recely, J. Hirman, and N. Cohen*, Proc. Workshop at Hitachi “Solar-Terrestrial Prediction”, Japan, 1996, **5**, 77 (1996).
4. *П. А. Откидычев, Н. Н. Скорбеж*, в “Солнечная и солнечно-земная физика – 2013”, ред. Ю.А. Наговицин, Изд. ВВМ, Санкт-Петербург, 111 (2013), [http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf\\_2013/conf\\_2013.pdf](http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf_2013/conf_2013.pdf).
5. *C. Fröhlich*, Surv. Geophys. **33**, 453 (2012).
6. *W. Livingston and F. Watson*, Geophys. Res. Lett. **42**, 9185 (2016).
7. *S. J. Hofmeister, A. Veronig, M. A. Reiss, M. Temmer, S. Vennerstrom, B. Vrsnak, and B. Heber*, Astrophys. J. **835**, 17 (2017).
8. *S. G. Heinemann, M. Temmer, N. Heinemann, K. Disauer, E. Samara, V. Jercic, S. J. Hofmeister, and A. M. Veronig*, Solar Phys. **294**, 144 (2019).
9. *K. Harvey, J. Harvey, and N. Sheeley*, Solar Phys. **79**, 149 (1982).
10. *D. J. McComas, N. Angold, H. A. Elliott, G. Livadiotis, N. A. Schwadron, R. M. Skoug, and C. W. Smith*, Astrophys. J. **779**, 10 (2013).
11. *В. В. Васильева, А. Г. Тлатов*, в “Солнечная и солнечно-земная физика-2015”, ред. А. В. Степанов Ю. А. Наговицин, Изд. ВВМ, Санкт-Петербург, 39 (2015).
12. *R. Selvakumaran, B. Veenadhari, S. Akiyama, M. Pandya, N. Gopalswamy, S. Yashiro, S. Kumar, P. Mäkelä, and H. Xie*, J. Geophys. Res. (Space physics) **121**, 8188 (2016).
13. *В. Н. Ишков*, Изв. РАН, сер. физ. **62**, 1835 (1998).
14. *S. E. Gibson, J. U. Kozyra, G. de Toma, et al.*, J. Geophys. Res. **114**, A09105 (2009).
15. *R. Ebert, D. McComas, H. Elliott, and R. Forsyth*, J. Geophys. Res. **114**, 109 (2009).
16. *Y. Hao, H. Shi, Z. Xiao, and D. Zhang*, Ann. Geophys. **32**, 809 (2014).
17. *M. Paassilta, O. Raukunen, R. Vainio, E. Valtonen, et al.*, J. Space Weather & Space Clim. **7**, A14 (2017).
18. *Ю. И. Логачев, Г. А. Базилевская, Е. И. Дайбог, Е. А. Гинзбурги др.*, электронное издание: “База данных по наукам о Земле” (2019), <http://esdb.wdcb.ru/>.
19. *R. Mewaldt, C. Cohen, C. Mason, T. Von Rosenvinge, and A. Vourlidas*, 34th Intern. Cosmic Ray Conf. Hague. Netherlands, 8 (2015), <https://pos.sissa.it/236/139/pdf>.
20. *В. Н. Ишков*, Геомаг. и аэрономия **61**, принята в печать (2021).
21. *В. Н. Ишков*, Геомаг. и аэрономия **53**, 971 (2013).
22. *Ю. А. Фурсяк*, Изв. КРАО **111**, 19 (2015).