

СОЛНЦЕ В XXI ВЕКЕ: 24 СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ – НАЧАЛО 2-Й ЭПОХИ ПОНИЖЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В.Н. Ишков

1. Мы расстались с читателями календаря, когда 24-й цикл солнечной активности (СА) только вступил в завершающий период своего развития – последние 2 года фазы минимума, а встречаемся снова, когда текущим циклом уже почти два года стал 25-й.

В статье приняты следующие сокращения: СА – солнечная активность; СЦ – солнечный цикл, солнечная цикличность; АО – активная область; площадь группы пятен (Sp) измеряется в миллионных долях полусферы – мдп; КД – корональные дыры; КВВ – корональные выбросы вещества (coronal mass ejection – CME); ОКП – околоземное космическое пространство; с.е.п. – солнечная единица потока ($1 \text{ с.е.п.} = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$).

Напомню, что одной из самых замечательных особенностей Солнца являются регулярные, почти периодические 11-летние изменения солнечных индексов – циклы СА, которые в паре составляют основной физической 22-летний СЦ в магнитном поле нашей звезды. Постоянные наблюдения солнечных пятен в Европе по одной методике усилиями немецкого астронома Р. Вольфа начались с 1849 г., и этот год считают началом научных наблюдений Солнца (достоверный ряд W1). Это результат усилий и пунктуальности немецкого астронома Г. Швабе, не пропускавшего ни единого солнечного дня для зарисовки солнечных пятен, который и стал открывателем солнечной цикличности (правда, он пытался открыть новую планету между Меркурием и Солнцем). Кроме того, Вольф восстановил среднемесячные значения чисел пятен с 1749 г. (пронумерованный ряд, W2) и среднегодовые с 1700 г. по отрывочным данным отдельных европейских наблюдателей. Современные исследователи по литературным данным качественно продлили этот ряд до 1610 г., когда Галилей построил первый телескоп. Проведённое сравнение рядов W1 и W2, и проверка их согласованности и спектральных характеристик [1], показало, что это два разных ряда по поведению различных характеристик, например увеличение длины ряда, что и происходит в реальности, ведет к ухудшению разрешения значимых его характеристик (обычно наоборот) и существенно искажает "высокочастотную" часть его составляющих. Кроме того, за первые 100 лет в восстановленной части ряда W2 выявились несколько особенностей, которые не проявились во всём 172-летнем достоверном ряде. Этот результат приводит к выводу о невозможности использования восстановленного интервала и, следовательно, всего пронумерованного ряда W2 для исследования влияния СА на различные долговременные природные процессы, а можно пользоваться лишь достоверным рядом W1 (1849 – 2021 г.). В то же время, в статистику достоверных СЦ для ограниченного круга задач можно условно включать СЦ 8 и 9 [1], примыкающие к достоверным и не противоречащие основным характеристикам СЦ достоверного ряда, увеличив тем самым статистику до 17 циклов СА (192 г.). Напомню читателю, что в обработке наблюдений солнечных пятен в большинстве случаев используются сглаженные за год месячные значения (W^*), чтобы сгладить ежемесячные колебания значений числа солнечных пятен, которые в максимуме могут достигать значительных величин.

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 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 V1, использование новой системы особо оговаривается.

2. Наблюдения показывают, что последние два СЦ (22 и 23) и прошедший СЦ24 были достаточно необычными по своим характеристикам и в какой-то степени нарушали сложившуюся к последнему десятилетию 20 века картину развития СЦ, что и дало возможность впервые обсудить наиболее вероятный сценарий солнечной цикличности [2].

Стало ясно, что достоверный ряд относительных чисел солнечных пятен показывает удивительное постоянство в основных проявлениях развития отдельных 11- и 22-летних СЦ и структура (сценарий) его цикличности, на данной статистике, показывает периодическую смену эпох СА:

- пониженной (СЦ12 – 16, 24 и, с большой вероятностью, 4 последующих), когда фоновые значения общего магнитного поля Солнца находятся на самых низких уровнях, и энергетики Солнца не хватает на реализацию высоких солнечных циклов ($W^* \geq 135$);

- повышенной (СЦ18 – 22, 10 – 8, 7, 6, последние два гипотетически) СА, когда фоновые значения общего магнитного поля Солнца находятся на самых высоких уровнях и не наблюдается низких СЦ ($W^* \leq 85$);

- переходные периоды (СЦ 11, 10; 23, 22 и 17, 18) примерно в 17 лет между эпохами, захватывающие часть примыкающего СЦ, предыдущего или последующего. В эти периоды меняется характер пятнообразовательной активности: солнечные пятна рождаются в практически переменном магнитном поле, увеличивающемся при переходе от пониженной к повышенной СА и, наоборот, в уменьшающемся при обратном переходе. Или более научно – режим генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне Солнца перестраивается к последующей эпохе, что впрямую, по мнению автора, указывает на то, что СА работает в режиме двухстадийного механизма динамо.

Таким образом, реальный сценарий СА прямо приводит к заключению, что образование пятен на Солнце осуществляется в трёх разных режимах, соответствующих эпохам СА, которые и определяют характер пятнообразовательной активности, давая возможность преобладать либо небольшим группам пятен с пониженной вспышечной активностью, либо открывая возможность образовываться большим высокоактивным группам пятен сложной магнитной конфигурации. В переходные периоды солнечные пятна образуются в переменном по величине магнитном поле и образуют "смесь" разных допустимых физических условий.

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 поляр-

ности головного и хвостового пятен в каждом полушарии меняют знак на противоположный при последовательном переходе от одного 11-летнего цикла к другому. Это же относится и к закону Джойса (угол наклона биполярных структур от ведущего пятна к хвостовому изменяется в зависимости от их гелиошироты, причём ведущие пятна расположены ближе к экватору), и к правилу Вальдмайера (чем больше скорость роста цикла, тем он выше). Внутри эпох, несомненно, выполняется и правило Гневывшева – Оля: нечётный 11-летний цикл выше, чем предшествующий четный цикл. Средняя сглаженная за эпоху (5 СЦ) площадь групп пятен в эпохи повышенной СА почти 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 (рис. 1).

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.

В переходные периоды могут нарушаться некоторые из наблюдательных правил развития циклов, что и произошло единственный раз в СЦ 22 и 23 с правилом Гневывшева – Оля, когда четный 22-й цикл (наибольший среди четных), единственный раз в истории достоверного ряда, стал выше нечётного 23-го, а большинство самых мощных вспышечных событий в СЦ 22 осуществилось в фазе максимума, а на фазах спада и минимума больших солнечных вспышечных событий (рентгеновского класса ?X) не наблюдалось. Заметим, что 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 служебные (т.е. постоянно получаемые) 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, разнесённым по полушариям, среднеширотным геомагнитным обсерваториям, осуществляющим непрерывную запись состояния магнитного поля Земли. По этим непрерывным данным легко выделя-

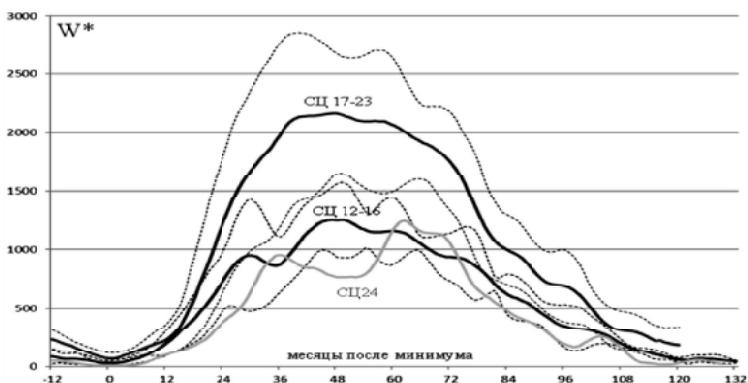


Рис.1. Средняя сглаженная за эпоху (5 СЦ) площадь групп пятен в эпохи повышенной СА почти вдвое превышает это значение в эпохи пониженной СА (<http://users.telenet.be/j.janssens/SC24web/SC24.html#Area>)

лись 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 её геоэффективность в первую эпоху пониженной СА. Только с началом космической эры (СЦ19, начало 60-х годов 20 века) наблюдения Солнца и его влияния на ОКП становятся регулярными и всё более полными.

3. Начавшийся в январе 2009 г. СЦ 24 развивался в условиях, когда, после переходного 23 цикла СА, фоновые значения общего магнитного поля Солнца уменьшились более чем в два раза, что и привело к полной перестройке физических условий на Солнце, и, как следствие, в межпланетном пространстве, что естественным образом отразилось на состоянии ОКП. Он развивался как цикл низкой величины, вспышечная активность которого существенно ниже всех предыдущих СЦ космической эры, и открывает вторую эпоху пониженной СА. На рис. 2 показан ход развития СЦ эпох 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.

За первым пиком в XI 2011 г. после небольшого, но продолжительного (15 мес.) спада в числах Вольфа, текущий цикл стал уверенно расти и к IV 2014 г. достиг своего максимума $W^*=81.9$ (табл. 1).

Таблица 1. Основные этапы развития 24 цикла СА

– начало: 01 2009 ($W^*_{min} = 1.8$);	– ветвь роста: 5.3;
– начало фазы роста: 04 2011 г. (W^*_{30});	– фаза максимума цикла: 08 2013-07 2014 г.;
– первый максимум: $W^*=45.5$: 11 2011 г.;	– начало фазы спада 07 2014 г.;
– максимум цикла: 04 2014 г. $W^*_{max}=81.9$;	– ветвь спада: ≥ 5.7 г.;
– максимум потока радиоизлучения на волне 10.7 см: 06 2014 г. ($F^*_{max}=145.5$ с.е.п.);	– начало фазы минимума ($W^*\leq 30$) – 04 2016 г.;
– переполусовка общего магнитного поля Солнца: 05 2012 – 06 2015 г.	– точка минимума цикла: 12 2019 г. ($W^*\leq 1.3$); по радиоизлучению на 10.7 см в (≤ 69.3 с.е.п.)

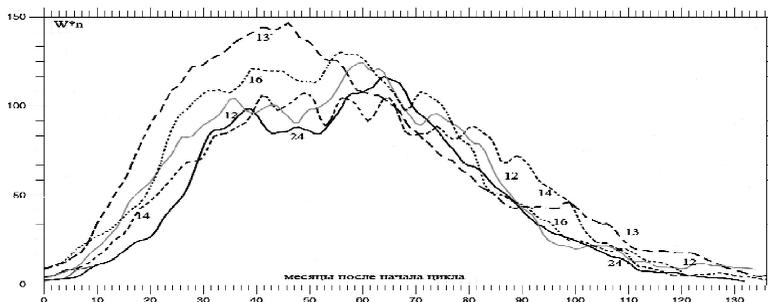


Рис. 2. Развитие СЦ 24 в сравнении с низкими (12 – серый, 14, 16) и средним (13) СЦ в сглаженных относительных числах пятен ($W^*_п$ – в новой системе V2). Преобразованный рисунок из http://www.solen.info/solar/images/comparison_similar_cycles.png

Исследование текущего СЦ выявило некоторые принципиальные особенности его хода развития:

– первая особенность состоит в том, что ни в одном СЦ первой эпохи пониженной СА (да и во всей совокупности достоверных СЦ) первый пик не проявлялся так четко и с такой разницей в пиковых значениях ($\Delta W^* \sim 15$), а с учётом спада после первого пика промежуточный участок роста занял интервал $\Delta W^* \sim 30$;

– второй особенностью стала рекордная для всего достоверного ряда продолжительность ветви роста, которая составила 5.32 г. (Табл. 1), до этого рекорд держал СЦ12 (5.0 г.) – начальный цикл первой эпохи пониженной СА;

– третьей особенностью стало наименьшее количество больших ($Sp \geq 1000$ миллионных долей полусферы – мдп), очень больших ($Sp \geq 1500$ мдп) и гигантских ($Sp \geq 2000$ мдп) групп пятен не только среди всех СЦ космической эры, но и всех СЦ первой эпохи пониженной СА. На I 2020 г. на Солнце появилось всего 16 больших групп пятен, из них 5 очень больших и одна гигантская – $Sp = 2700$ мдп (16/5/1), тогда как в 12-ом СЦ таких групп пятен было 23/10/0, в 13 СЦ – 37/9/2, 21/7/2 в 14 СЦ, 21/7/2 в 15 СЦ и 33/10/3 в 16 СЦ;

– четвёртой особенностью стала наименьшая продолжительность существования групп пятен, причём текущий СЦ стал лидером по количеству групподнювок. Среднее число пятен в группе, средний размер отдельно взятой группы, а также среднее число регистрируемых пятен и групп являются наименьшими среди всех СЦ космической эры.

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

– Первая устойчивая группа пятен появилась в северном полушарии в I 2009 г., а в южном – только в V 2009 г. Это второй случай (23-й цикл), когда первая устойчивая группа пятен появляется в момент начала цикла (обычно за 1-1.5 г. до точки минимума).

– Появление первой большой ($Sp \geq 500$ мдп) группы солнечных пятен – II 2011, а первой очень большой ($Sp \geq 1500$ мдп) – XI 2011 г. и единственной гигантской ($Sp \geq 2500$ мдп) – X 2014 г. На III 2018 г. на видимом диске Солнца появилось всего 16 групп пятен с площадью $Sp \geq 1000$ мдп, из них 5 – с $Sp \geq 1500$ мдп и одна – $Sp \geq 2500$ мдп.

– Избыток появления групп пятен по полушариям Солнца (асимметрия СА) складывался следующим образом: до середины 2013 г. наблюдалось преобладание пятнообразовательной активности Северного полушария Солнца и первый максимум, связанный с ним, приходится на XI 2011 г. ($W^* = 45.5$), затем картина резко меняется, и группы пятен чаще появляются в Южном полушарии с максимумом в апреле 2014 г. Однако с самого начала 2016 г. опять наблюдается устойчивое преобладание групп пятен Северного полушария Солнца (рис.3).

– Сглаженные значения потока радиоизлучения на длине волны 10 см (2695 МГц) в VII 2008 г. – II 2009 г. оставались на уровне $F_{10.7} = 68$ с.е.п. (Рис.4), это наибольший временной интервал самых низких значений за всю историю радионаблюдений Солнца, а значение $F_{10.7}$ в максимуме цикла стало самым низким со времени начала радионаблюдений (с 1947 г.) – 145.5 с.е.п.

Процессы перестройки общего магнитного поля к уровню эпохи пониженной СА, начавшиеся в середине 22-го и захватившие весь 23-й цикл, привели к значимому уменьшению общего магнитного поля Солнца (<http://www.leif.org/research/Solar%20Mean%20Field%202003-now.png>), следствием которого стало:

– значительное уменьшение (≥ 700 Гс от уровня 1998 г.) величины магнитного поля в тенях пятен, которое стабилизировалось на уровне ~ 2030 Гс (<http://www.leif.org/research/Livingston%20and%20Penn.png>);

– заметное уменьшение величины магнитного поля КД, занимающих интервал 0.2-8.7 Гс (со средней величиной 3.0-1.6 Гс) по сравнению с предыдущими СЦ (3-36 Гс) и ~20-22 Гс в фазах максимумов и 1-7 Гс (со средним ~5 Гс) в минимумах предыдущих солнечных циклов, что, с большой вероятностью, ослабило геоэффективность их высокоскоростных потоков; в период минимума 24-го цикла площадь КД была максимальна, а напряженность и поток магнитного поля оказались минимальными за весь период наблюдений КД;

– смена режима изменений полярных магнитных полей: величина полярного магнитного поля была около 7-8 Гс в фазах минимумов предыдущих 3 циклов и только 4-5 Гс в последнем минимуме 2008-2009 (<http://www.leif.org/research/Solar%20Mean%20Field%202003-now.png>);

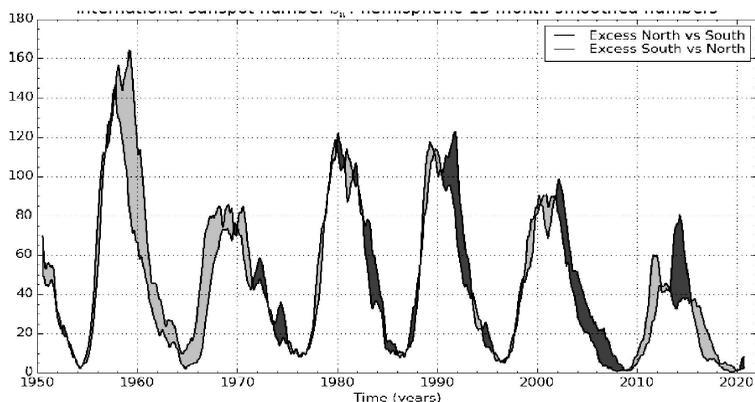


Рис. 3. Асимметрия появления групп солнечных пятен по полушариям Солнца: чёрное – Северное, серое – Южное. Преобразованный рисунок из <http://sidc.oma.be/silso/monthlvhemisphericlot>

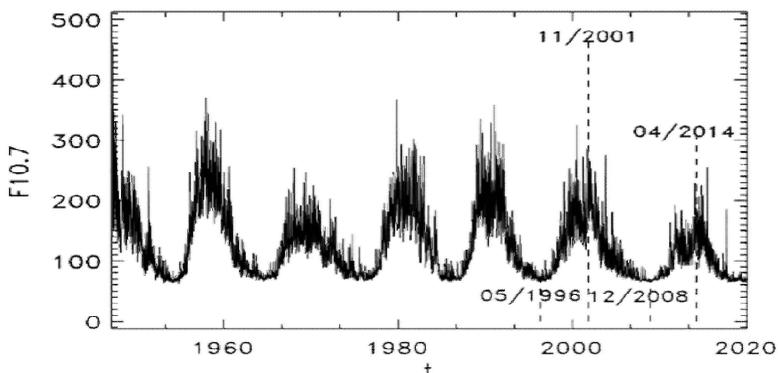


Рис. 4. Вся история наблюдений радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см с 1947 г. В верхней части приводятся даты максимумов 23 и 24 циклов СА, в нижней части – даты соответствующих минимумов: <http://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-6-mavg-en.php>.

– сложная картина переполосовки общего магнитного поля Солнца в фазе максимума цикла: в северном полушарии Солнца процесс переполосовки занял ~3 г. (V 2012-VI 2015 г.), переполосовка в южном полушарии прошла в более сжатые сроки, с середины 2013 и до III 2014 г., таким образом, полный период переполосовки занял более 3-х лет, что является рекордом по длительности процесса для СЦ космической эры (<http://www.leif.org/research/WSO-Polar-Fields-since-2003.png>);

– количество корональных выбросов вещества уменьшилось незначительно, но их угловая ширина заметно увеличилась для событий одинаковой скорости распространения в СЦ 23;

– 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 (β) (~11%), температуры (~40%), теплового давления (~55%), массового потока (~34%), потока импульса или динамического давления (~41%), потока энергии (~48%), величины межпланетного магнитного поля (~31%) и его радиальной составляющей (~38%), протонного динамического давления – остается вблизи самых низких значений, наблюдаемых в космической эре: ~1.4 нПа, по сравнению с середины 1970-х до середины 1990-х гг. – ~2.4 нПа;

– падение величины межпланетного магнитного поля привело к значительному росту (20%) фоновых значений галактических космических лучей, что отразилось в данных на нейтронных мониторах – величина фоновых значений почти приблизилась к рекордным значениям 2008 г. (<http://users.telenet.be/j.janssens/SC24web/SC24.html#CosmicRays>);

– вспышечная активность на самом низком уровне за последние 70 лет (18-23 циклы СА) и на декабрь 2019 г. развития осуществилось: 644 солнечных вспышки с баллом $M \geq 1$; 158 больших, среди которых: 100 балла $M5-X1$, 58 – балла $X \geq 1.0$, из которых 4 – балла $X > 5$; первая большая вспышка ($M \geq 5$) осуществилась в феврале 2010 г. в АО северного полушария, а первая мощная солнечная вспышка $X6.9/2B$ осуществилась в группе пятен северного полушария 9.08.2011 г. В таблице 2 приводится список самых мощных (для данного цикла) вспышек текущего СЦ, начиная от $X2$, с их параметрами, КВВ и степенью воздействия на ОКП.

Таблица 2. Наиболее интенсивные ($\geq X2$) вспышки текущего 24 цикла СА

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

* – два рентгеновских всплеска во время одной большой вспышки (X9.3+X2.2).

АО – активная область по нумерации Службы состояния околоземного космического пространства США; КВВ – тип: Н – "гало", рН – "частичное гало". Поток излучения в максимуме события по шкале воздействия R: 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 – магнитная буря и её интенсивность по шкале воздействий G.

Важно отметить, что в текущем 24-м цикле уменьшилось время между первыми признаками появления значимого нового магнитного потока и началом периода вспышечного энерговыделения (10-20 ч.), хотя сам период (~55 ч.) изменений не претерпел [3], что привело к появлению АО, в которых значимые вспышечные события наступали непосредственно в день начала всплытия нового магнитного потока. Этот факт несколько усложняет возможность оперативного прогноза периода осуществления больших солнечных вспышек. В прошедших циклах космической эры этот временной интервал составил не менее 24 ч.;

– значимо упало число солнечных протонных событий ($E_{\text{пр}} > 10 \text{ МэВ}$), 96 против 149 в 23, 127 в 22, 146 в 21 и 144 в 20 циклах СА, особенно больших (8) и очень больших (5), а также количество возрастных (3) на нейтронных мониторах (вспышки в космических лучах). Наиболее значимые протонные события СЦ24 приведены в Таблице 3.

– катастрофично упало число магнитных бурь, особенно умеренных (40%) и больших (80%) магнитных бурь по сравнению с солнечными циклами космической эры. Наиболее значимые магнитные бури приведены в Таблице 4;

– Ар-индекс достиг минимума в X 2009 г., спустя 10 мес. после минимума в числах Вольфа. Максимум среднемесячных значений Ар-индекса достиг в IX 2017 г. (18.1), с предыдущими пиками в III 2015 г. (16.3), III 2012 г. (16.1) и в IX 2015 г. (15.8). В VI 2015 г. сглаженное значение Ar^* -индекса впервые в цикле превысило 10 (<http://legacy-www.swpc.noaa.gov/ftppdir/weekly/Ap.gif>).

Таблица 3. Наиболее значимые солнечные протонные события 24 цикла СА

№	Солнечное протонное событие			Источник: BCB, вспышка, КВВ				
	T_0 Г М Д/УТ	$T_{\text{макс}}$ Д/УТ	Pr (GLE) pfu	T_0 (Д/УТ)	Балл	КВВ	Локализация	АО
1	20120307/0510	08/1115	6530	07/0024	X5	H	N17E15	11429
2	20120123/0530	24/1530	6310	23/0359	M8	H	N28W36	11402
3	20130522/1420	23/0650	1660	22/1332	M5	H	N15W70	11745
4	20170910/1630	10/1645	1490 GLE	09/1535	X8.2	H	S08W90	12673
5	20150621/2135	22/1900	1070	21/0236	M2	H	N13W00	12371
6	20140106/0915	09/0340	1033	07/1832	X1	PH	S15W11	11944
7	20170906/0950	07/2330	840	06/0852	X2.2, X9.2	H	S08W33	12673
8	20120127/1905	28/0205	796	27/1837	X1	H	N27W71	11402
9	20120313/1810	13/2045	469	13/1741	M7	H	N18W62	11429
10	20120517/0210	17/0430	255 GLE	17/0147	M5	pH	N12W89	11476
11	201704/2230	05/1930	210	04/1959	M1.5, M5.5	pH	S10W11	12673
12	20130930/0505	30/2005	182	29/2337	C1/BCB		N15W40	
13	20120717/1715	18/0600	136	17/1715	M1	pH	S17W75	11520
14	20140911/0240	12/1555	126	10/1745	X1	H	N16W06	12158
15	20130411/1055	11/1645	114	11/0716	M6	H	N09E12	11719
16	20140225/1355	28/0845	103	25/0049	X4	H	S12E82	11990

Pr – поток протонов в максимуме события в $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ст}^{-1}$ (pfu); UT – всемирное время по Гринвичу; АО – активная область; BCB – выброс солнечного волокна; H – КВВ типа "гало"; pH – КВВ типа "частичное гало"; GLE – вспышки в космических лучах.

Таблица 4. Наиболее значимые магнитные бури текущего 24 цикла СА*

R	Магнитные бури					Источник		
	Дата начала г м д	SSC UT	Ar _{max} нТ	Aa _{max} нТ	Dst _{max} нТ	Дата макс. д м/UT	Событие, балл	КВВ UT/V км/с
1	2015/03/17	0445	108	146	-223	15.03/0115	C9.1	0148/719 Н
2	2017/09/08	07/2304	106	111	-142	06.09/1153	X9.3	1224/1497 Н
3	2012/03/09	1103	87	87	-145	07.03/0002	X5.4	0024/2684 Н
4	2012/07/15	1809	78	87	-139	12.07/1537	X1.4	1624/0657 Н
5	2015/10/07		74	94	-124		КД + ВСВ	
6	2015/06/22	1833	72	86	-204	19.06	M3.0+КД	1724/1305
7	2013/03/17	0600	72	81	-132	15.03/0546	M1.1	0712/1063
8	2016/05/08	0108	70	95	-083	05.05	КД+SB +ВСВ	
9	2015/12/20	19/1616	70	98	-155	15 – 16.12	3 ВСВ	
10	2015/09/11		60	84	-081	8 – 9.09	КД + 2 ВСВ	
11	2015/09/09		59	74	-99	5.09	КД + ВСВ	
12	2013/10/02	0154	58	75	-072	29.10/2143	X2.3, ВСВ	2200/1001 Н
13	2013/06/01	31/1618	58	65	-124	29.05	ВСВ + КД	
14	2016/10/25	0922	57	81	-060	20.10	ВСВ+КД	
15	2010/04/06	05/0826	55	62	-081	3.04	ВСВ	
16	2015/08/27		52	61	-080	08.24/0726	M5.6	0848/0272 рН
17	2013/06/29		50	67	-102	25.06	КД + ВСВ	

* ранжировка в системе Ар-индекса

SSC – внезапное начало магнитной бури; Ar_{max}, Aa_{max}, Dst_{max} – максимальные значения геомагнитных индексов в нТ; UT – всемирное время по Гринвичу; геоэффективное событие – вспышка, выброс солнечного волокна (ВСВ), Типы КВВ: Н – гало, рН – частичное гало.

5. Остановимся кратко на характеристиках и особенностях развития наиболее интересных вспышечно-активных групп пятен 24 цикла СА (по выбору автора).

Первые большие вспышечные события в СЦ24 осуществились уже в феврале 2010 г. в АО северного полушария. В первой из них 6.02 за 48 ч. осуществилось 7 вспышек средних баллов и первая в цикле большая (M6.4). С 10.02 начала быстро усложняться магнитная конфигурация другой группы пятен, и 12.02 в ней осуществилось большая вспышка класса M8.3. Только через год, 11.02 2011 г. на видимом диске Солнца образовалась АО, скорость всплывания которой была столь велика, что уже 15.02 площадь группы пятен стала большой (S_p≥500 мдп), а магнитная конфигурация центральной части стала предельно усложненной. Результатом такого бурного развития стали большие вспышки: 13.02 класса M6.6/1N, а 15.02 – первая в текущем цикле вспышка класса X2.2. Всего же за 69 ч. 13-16.02 в АО реализовались 2 большие и 5 вспышек средних баллов. Последняя большая вспышка (M6.6) осуществилась 18.02.

В группе пятен северного полушария 8-9.08.2011 г. осуществилось одно из самых мощных вспышечных событий текущего цикла СА – вспышка балла X6.9/2B, от которого в ОКП зарегистрировано малое протонное событие (S1).

В сентябре 2011 г. период осуществления больших солнечных вспышек тоже был связан с АО северного полушария, в которой 6-8.09 за 61 час осуществились четыре большие вспышки, в том числе класса X2.1 (6.09) и X1.8 (7.09). Возмущения от этих солнечных вспышек вызвали в ОКП умеренную магнитную бурю 9-10.09, начавшуюся с прихода двойной межпланетной удар-

ной волны, отразившейся в двух последовательных внезапных импульсах геомагнитного поля 9.09 – SI/1243UT и SI/1250 UT. 21.09 на видимый диск вышла первая в текущем цикле очень большая группа пятен площадью 1300 миллионов долей полусферы (мдп) и уже 22.09, прямо у восточного лимба, начался период осуществления больших вспышек: за 66 ч. 22-25.09 таких зарегистрировано пять – X1.4 (22.9), X1.9, M7.1 и M5.4 (24.9), M7.4 (25.09). Несмотря на неудобное положение этих вспышек для влияния на окрестности Земли, условия распространения возмущений позволили им вызвать умеренную (26-27.09) и малую (28-29.09) магнитные бури.

30.10 в полном развитии на видимый диск Солнца вышла AR11339 (N19L103, XRI=4.18: $X_1^{1.9}+M_0$), в которой уже со 2.11 за 59 часов произошли большая (X1.9 3.11) и 5 вспышек среднего балла.

13 января 2012 г. из-за восточного лимба появился долготный комплекс активных областей, образованный двумя группами пятен. Очень длительная по времени (>6 ч.) вспышка M3.2 19.01 вызвала в ОКП умеренную магнитную бурю 22.01. Вспышки балла M8.7 23.01 и X1.7 27.01. После первой из них у Земли зарегистрировано второе по величине потоков частиц (S3) протонное событие текущего солнечного цикла. И после второй большой вспышки 27.01 в ОКП осуществилось солнечное протонное событие средней интенсивности (S2).

В конце суток 1.03 2012 г. на видимый диск вышел комплекс активных областей с двумя группами пятен. Уже с 5.03 за 46 ч. первая группа пятен произвела две большие вспышки класса X и 10 вспышек класса M. Последней была двойная вспышка X5.4+X1.3, которая захватила обе АО и стала источником самого большого (S3) протонного события в текущем цикле SA. Кроме того, быстрый корональный выброс вещества от этого вспышечного события вызвал в ОКП 8-9.03 третью по величине большую магнитную бурю (Dst-145 nT). И, наконец, 13.03 на W59 осуществилась большая протонная вспышка класса M7.9 с потоком протонов в максимуме интенсивности, соответствовавшей среднему уровню (S2). Необходимо отметить, что подавляющее большинство протонных событий интенсивности S3 и S4 происходят во время вспышек, которые осуществляются именно в комплексах активных областей, конфигурация общего магнитного поля которых, по-видимому, способствует обильному выходу солнечных протонов в межпланетное пространство.

В июле 2012 г. в Южном полушарии одна за другой наблюдались большая (900 мдп) и очень большая (1460 мдп) группы пятен, в которых осуществились 7 больших вспышек, которые принесли в ОКП четыре протонных события 7, 9, 12 и 19.07.

В мае 2013 г. у восточного лимба в течение 57 часов 13-15 мая в одной группе пятен северного полушария осуществилась серия из четырех больших вспышек классов X: X1.7, X2.8, X3.2 и X1.2. Такая концентрация вспышечных событий балла X достаточно редкое событие, но, к сожалению, детальный анализ ситуации в этом случае был невозможен, так как вся подготовка этих событий происходила за восточным лимбом Солнца.

Наибольшая концентрация больших вспышек в 2013 г. наблюдалась в конце X – начале XI и связана с тремя группами пятен, в которых последовательно за 12 суток произошло семь вспышек класса X, но на ОКП эта концентрация мощных вспышек значимого влияния не оказала – воздействие ограничилось только излучением.

1.01.2014 г. на диске Солнца появилась большая, относительно спокойная АО, в которой до 7.01 осуществились только пять вспышек средних баллов. Однако во второй половине 05.01 к северо-востоку от ведущего пятна проявилось всплывание значимого нового магнитного потока, площадь АО стала очень большой (1560 мдп) и 7.01 за 8 ч. осуществились две большие солнечные вспышки. Первая, класса М7.2, произошла во внутреннем пространстве группы пятен и произвела малое протонное событие (S1), вторая, класса X1.2 осуществилась к юго-западу от большого ведущего пятна и вызвала в ОКП третье по величине большое (S3) протонное событие.

25.03 вблизи восточного лимба в выходящей группе пятен южного полушария осуществилась 4-я по интенсивности мягкого рентгена вспышка класса X4.9, которая стала источником большого (S2) и очень длительного протонного события, длившегося до 5.04. Вспышечная активность отмечена на высоком уровне 10-11.06, когда в небольшой группе пятен опять же южного полушария за 22 часа произошли три большие вспышки класса X2.2, X1.5 и X1.0.

Одним из наиболее значительных событий прошедшего 24-го цикла стало прохождение по видимому диску в октябре 2014 г. гигантской, самой большой за последние 20 лет группы пятен (рис. 5) площадью 2750 мдп, в которой произошло 10 больших солнечных вспышек, из которых 6 были класса X. Первая большая вспышка (X1.1) осуществилась уже на третий день (17.10) ее появления на видимом диске Солнца; следующая (X1.6) 22.10, а с 26 по 28.10 за 38 часов произошли 6 больших вспышек (26.11 – X2.0 и X1.0; 27.11 – M7.1, M6.7 и X2.0; 28.11 – M6.6).

Главной особенностью этих больших вспышечных событий – полное отсутствие КВВ, из-за чего эта АО практически не дала возмущений ни в корпускулярном излучении, ни в геомагнитном поле. Это может свидетельствовать о том, что крупномасштабные магнитные поля этой гигантской группы пятен были очень сильными и, крупномасштабная магнитная конфигурация АО была закрытой и представляла собой простую биполярную структуру, внутри которой по линии раздела полярностей и происходили большие вспышки, но выделенной во вспышках энергии не было достаточно, чтобы КВВ могли выйти за пределы этой структуры. После исследования этой АО стала понятной ситуация, которая сложилась на фазе роста СЦ 18, когда вспышечная активность экстремальных по площади групп пятен (например, Sp = 6140 мдп в III 1948 г.) не вызывала в ОКП больших магнитных возмущений.

Через 1.5 года после начала фазы минимума (апрель 2016 г.), на третьем обороте, в спокойной небольшой группе пятен Южного полушария с 3.09.2017 г. начали последовательно всплывать новые магнитные потоки, которые к 4.09 увеличили площадь группы пятен почти в четыре раза (рис. 6), а к 8.09 довели ее до максимального значения (1060 мдп). Как неоднократно бывало в текущем цикле, менее чем через сутки после начала процесса, уже 4.09 произошла первая большая вспышка (M5.5). В процессе взаимодействия новых магнитных потоков с собственным магнитным полем АО (6-8.09) осуществились 4 больших вспышки класса X (X2.2, X9.3, X1.7 – 6.09, X1.3 – 7.09) и 6 больших вспышек класса M. Всплывание следующего нового магнитного потока (9-10.09) привело еще к одной большой вспышке класса X8.2 (10.09). Таким образом, в этой АО произошли две самые мощные солнечные вспышки СЦ24 – X9.3 и X8.2. Этот период высокой вспышечной активности вызвали в ОКП солнечные события умеренной и большой интенсивности (S3 и S2), которые продолжались с 4 по 15.09. Кроме того, возмущения от них вызвали одну очень большую и две малые магнитные бури.

Надо отметить, что появление такой экстремально вспышечной АО в фазе минимума СЦ довольно частое явление. В прошлом 23-м цикле подобные высокоактивные группы пятен были отмечены в IX 2005 г. (3 года до точки минимума) и в XII 2006 г. (2 года до точки минимума). Но этот цикл был особый, переходный между эпохами повышенной и пониженной СА, и могло показаться, что это особенность переходного периода. Однако и в 21-м цикле (эпоха повышенной СА) такие группы пятен наблюдались в IV и V 1984 г. (2 года до точки минимума). Для эпохи пониженной СА у нас пока нет статистики, так как 24-й цикл – первый цикл наступившей второй эпохи, но эта закономерность, как мы видим, выполняется.

6. Из сказанного выше следует, что последние годы XX и начало XXI века дали возможность подробно исследовать процесс перехода СА от эпохи повышенной к эпохе пониженной СА и первый СЦ второй эпохи пониженной СА. Исследование достоверного ряда чисел Вольфа позволило создать морфологическую картину сценария солнечной цикличности который, на данной статистике, показывает удивительное постоянство в основных проявлениях структуры (сценария) его цикличности и показывает периодическую смену эпох СА: пониженной и повышенной, которые разделяются переходными периодами примерно в 17 лет, захватывающие часть примыкающего СЦ, предыдущего или последующего. В эти периоды меняется характер пятнообразовательной активности – режимов генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне, вследствие изменений в общем магнитном поле Солнца, что и показал 23 цикл СА. В этот переходной период было нарушено одно из наблюдательных правил – правило Гневешева – Оля, когда чётный 22-ой цикл СА, единственный раз в истории достоверного ряда, стал выше нечётного 23-его. Это, возможно указывает на то, что внутри эпох СА правило, безусловно, работает, как и было во всей истории достоверного ряда чисел Вольфа, но в переходные периоды оно может нарушаться. Этот цикл дал исследователям доказательства, что солнечные пятна могут зарождаться в условиях переменного магнитного поля, в данном случае падающего, что отразилось в падении величины магнитного поля в тенях (umbra) солнечных пятен (~ на 700 Гс за 16 лет), тени пятен стали ярче. Только в переходные периоды, как показали СЦ 23 – 22, с большой вероятностью, а может быть и исключительно, могут осуществляться экстремальные сол-

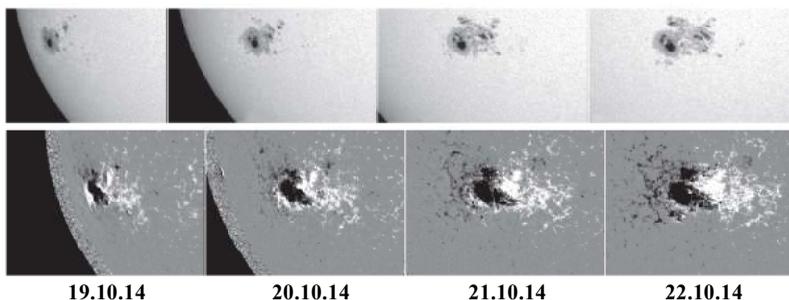


Рис. 5. Вид гигантской группы солнечных пятен 19-22.10.2014 г. Линия раздела полярностей проходит по центральной области группы слева направо по диагонали. Север сверху. По наблюдениям космической солнечной обсерватории SDO (Solar Dynamic Observatory)

нечные вспышечные события – вспышки X – VI 1991 г. и XI 2003 г. стали самыми мощными после знаменитой вспышки Кэррингтона 1.09.1859 в СЦ 10, часть которого с СЦ 11 также вошла в переходной период между эпохой повышенной СА и первой эпохой пониженной СА (СЦ 12 -16). Концентрация экстремальных солнечных вспышек и солнечных протонных событий в рассматриваемый СЦ 23 стала значимо выше, чем в СЦ эпохи повышенной СА (СЦ18 – 23).

Солнечный цикл 24, как и положено циклу, открывающему вторую эпоху пониженной СА, развивался как цикл низкой величины, пятнообразовательная и вспышечная активность которого существенно ниже всех предыдущих СЦ космической эры. Изучение 24 цикла СА современными методами и средствами наблюдений дало нам понимание условий развития солнечных активных явлений при пониженных фоновых значениях общего магнитного поля, которые отразились практически на всех активных солнечных явлениях, как связанных с АО (вспышки, КВМ), так и на КД, магнитные поля которых значимо уменьшились. Это впрямую отразилось и на межпланетном простран-

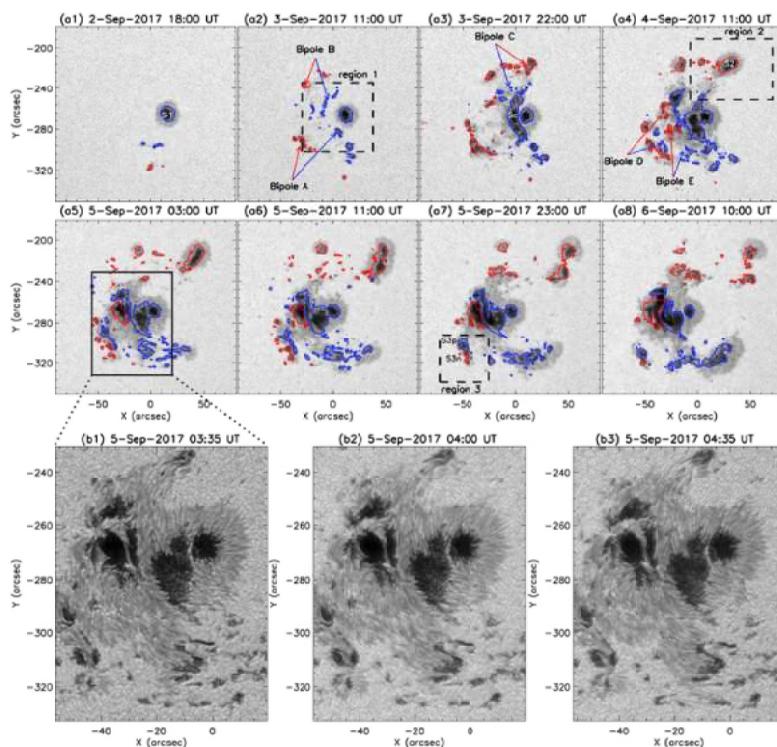


Рис. 6. Развитие группы пятен AR12673 2 – 6 сентября 2017 г. по наблюдениям космической обсерватории SDO в белом свете с наложенным магнитным полем: красные и синие солнечные пятна передают "-" и "+" полярности, соответственно [4].

Таблица 5. Наиболее вспышечно-продуктивные АО 1972 – 2020 гг.

№	СМР	AR	Φ _o	L _o	Sp _{max}	R/ S/ G	XRI	SC M±y
1	09 06 1991	6659	N31	248	2300	R5/S4/G4	>86.5	22 +2
2	<i>29 10 2003</i>	<i>10486</i>	<i>S17</i>	<i>354</i>	<i>2610</i>	<i>R5/S5G5</i>	<i>>62.56(73.06)</i>	<i>23 +3.5</i>
3	12 03 1989	5395	N34	257	3600	R5/S4/G5	57.0	22 -0.5
4	<i>14 09 2005</i>	<i>10808</i>	<i>S09</i>	<i>229</i>	<i>1430</i>	<i>R5/S3/G3</i>	<i>49.21</i>	<i>23 +5.5</i>
5	08 06 1982	3763	S08	086	1270	R4/S2/G-	42.4	21 +2.5
6	04 07 1974	0433	S14	156	1334	R4/S3/G-	?41.4	20 +5.5
7	16 12 1982	4025	S06	089	500	R4/S2/G-	36.7	21 +3
8	23 03 1991	6555	S23	188	2530	R4/S5/G-	32.6	22 +1.5
9	15 06 1982	3804	N14	322	2960	R4/S4/G-	31.6	21 +2.5
10	14 07 1978	1203	N18	170	1600	R5/S2/G-	29.7	21 -1
11	<i>10 04 2001</i>	<i>9415</i>	<i>S22</i>	<i>359</i>	<i>880</i>	<i>R4/S3/G-</i>	<i>28.73</i>	<i>23 +1</i>
12	08 07 1989	5629	S17	076	1320	R5/S4/G4	?26.8	22 -0.5
13	04 08 1972	0331	N12	010	1330	R5?/S5/G5	?26.0	20 +3.5
14	11 11 1980	2779	S11	098	2000	R3/S1/G4	25.9	21 +1
15	<i>28 03 2001</i>	<i>9393</i>	<i>N20</i>	<i>152</i>	<i>2440</i>	<i>R5/S2/G-</i>	<i>>25.74 (28.24)</i>	<i>23 +1</i>
16	17 05 1990	6063	N34	321	940	R3/S3/G-	23.1	22 +1
17	12 01 1989	5312	S31	308	1800	R3/S1/G-	22.4	22 -0.5
18	<i>15 01 2005</i>	<i>10720</i>	<i>N09</i>	<i>177</i>	<i>1630</i>	<i>R4/S3/G4</i>	<i>21.5</i>	<i>23 +4.7</i>
19	28 04 1984	4474	S13	334	2160	R5/S3/G-	21.2	21 +5
20	<i>11 12 2006</i>	<i>10930</i>	<i>S06</i>	<i>009</i>	<i>680</i>	<i>R4/S2/G4</i>	<i>20.8</i>	<i>23 +6.6</i>
21	<i>23 10 2014</i>	<i>12192</i>	<i>S13</i>	<i>248</i>	<i>2740</i>	<i>R4/-/-</i>	<i>20.32</i>	<i>24 +0.5</i>
22	<i>03 09 2017</i>	<i>12673</i>	<i>S08</i>	<i>117</i>	<i>1060</i>	<i>R5/S3/G3</i>	<i>18.97</i>	<i>24 +3.4</i>
23	18 06 1982	3776	N13	312	3300	R4/S1/G-	18.8	21 +3

СМР – время прохождения АО центрального меридиана Солнца; AR – номер АО в системе NOAA; Φ_o – средняя широта АО; L_o – средняя кэррингтоновская долгота АО; Sp_{max} – наибольшее значение площади группы пятен в миллионных долях полушарья; R,S,G – максимальная интенсивность событий от вспышек в данной АО в ОКП в пяти-балльной системе: R – электромагнитный удар, S – поток солнечных протонов, G – геомагнитные бури; SC M±y – № ЦЦ, расстояние в годах от точки максимума соответствующего цикла CA (точность 0.5 г.); курсивом выделены АО 23 и 24 циклов CA.

стве, вызвав значительное падение величин всех параметров солнечного ветра по сравнению со средними показателями в эпоху повышенной СА. Ослабление режима выноса солнечных магнитных полей привело к уменьшению зоны модуляции галактических космических лучей и значительному росту их фоновой интенсивности в межпланетном пространстве (на ~20%) 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 полётов в открытом космосе и обитаемых станций на поверхности Луны с длительным сроком пребывания одной команды до конца эпохи пониженной СА (~ до 70 годов 21 века). Спорадический нагрев земной атмосферы заметно уменьшился, что привело к еще большему загрязнению ОКП (неблагоприятный режим очистки низких орбит от космического мусора) и поставило (или в ближайшем будущем поставит) в повестку дня нашей цивилизации вопросы безопасности запусков космических аппаратов. В то же время, следствием наблюдаемого дефицита солнечных активных явлений стало уменьшение числа сильных геомагнитных возмущений, больших протонных собы-

тий, а очень большие и экстремальные вспышечные события стали маловероятны. Геоэффективность высокоскоростных потоков солнечного ветра из КД заметно упала и в ОКП они обеспечили относительный рост числа только рекуррентных, малых геомагнитных возмущений (малых магнитных бурь интенсивности S0 и суббурь), и, соответственно, выросла длительность периодов спокойных и слабозвозмущённых геомагнитных условий. Количество больших магнитосферных и ионосферных возмущений стало заметно ниже, т.е. мы живём в более спокойных природных электромагнитных условиях.

Итак, Солнце вступило в период малых и средних СЦ, который должен продлиться 5 циклов (~55 лет) – эпоху пониженной СА. Так как внутри эпох СА, без исключений выдерживалось правило Гневывшева – Оля, текущий 25 СЦ должен быть средней величины, выше текущего ($W^* \sim 100 - 120$), но ни в какой мере не большим и не низким.

Исходя из наблюдательных характеристик СЦ первой эпохи пониженной СА и устойчивости сценария развития солнечной цикличности, можно с большой долей уверенности дать прогноз, что последующие 4 СЦ будут поочерёдно циклами средней и низкой величины. Подтверждение этого утверждения мы получим уже в 2022 г., когда текущий 25 цикл СА войдёт в фазу роста и, согласно правилу Вальдмайера, попадёт в семейство средних или низких СЦ.

Для активных любителей – исследователей Солнца и солнечной активности – привожу таблицу (табл. 5) наиболее вспышечно-продуктивных групп пятен 1972 – 2020 г.г., солнечные циклы 20-24, когда рентгеновский класс солнечных рентгеновских вспышек вошёл в обязательную номенклатуру Службы Солнца и стало возможным оценивать их интенсивность в однородных физических единицах, интенсивности в максимуме мягкого рентгеновского излучения в диапазоне волн (1 – 8 Å) или в энергиях (12.5 – 1 кэВ).

Литература

1. Ишков В.Н. Шибавев И.Г. Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования. Известия РАН, серия физическая, 2006, т. 70, № 10, стр.1439-1442.
2. Ишков В.Н. Периоды "пониженной" и "повышенной" солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // Сб. "Солнечная и солнечно-земная физика – 2013", под ред. Ю.А. Наговицина, Изд. ВВМ, Санкт-Петербург, 2013, с. 111 – 114, http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf_2013/conf_2013.pdf.
3. Ишков В.Н. Всплывающие магнитные потоки - ключ к прогнозу больших солнечных вспышек // Изв. РАН, сер. физ. Т. 62. № 9. С. 1835-1839. 1998.
4. Yang S., Zhang J., Zhu X., Song Q. Block-induced complex structures building the flare-productive solar active 12673, arXiv:1710.06545v1 [astro-ph.SR] 18 Oct 2017.