

УДК 523.9:52-125

ТЕКУЩИЙ 24 ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ФАЗЕ МИНИМУМА: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИТОГИ И ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ

© 2020 г. В. Н. Ишков*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Россия
*ishkov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 10.03.2020 г.

После доработки 17.05.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Характеристики и ход развития текущего 24 цикла солнечной активности (СА) позволяют отнести его к циклам эпох пониженной СА. Сравнение эволюционных изменений циклов различных эпох в фазах минимума позволило выделить две группы по темпу спада. Первая группа с относительно быстрым спадом (~15 мес.) включает в себя все циклы эпох повышенной СА, переходных периодов и цикл 16 из эпохи пониженной СА. Вторая, с медленным спадом (~40 мес.), остальные циклы эпох пониженной СА, в том числе и текущий 24, минимум которого можно ожидать уже в первой половине 2020.

DOI: 10.31857/S0023420620060060

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых замечательных особенностей Солнца являются регулярные, почти периодические изменения солнечных индексов, которые характеризуют весь комплекс явлений на Солнце — циклы солнечной активности (СА). Основной задачей исследований солнечной цикличности является построение модели ее изменчивости с течением времени, выявление основных физических законов описывающих СА в целом и, основываясь на полученных результатах, прогнозирование последующих солнечных циклов (СЦ). Для корректного решения этих задач необходимо быть уверенным в используемом достоверном наблюдательном материале и знать условия и границы применимости восстановленных рядов наблюдений. Кроме того, надо учитывать и сравнительно небольшую статистику достоверных наблюдений по самым длительным наблюдательным индексам: относительному числу солнечных пятен (W) и количеству и площадям групп пятен, которые определяются с 1849 г. — первые, и с 1878 — вторые, когда регулярные наблюдения солнечных пятен стали вести несколько обсерваторий в Европе. Таким образом был получен достоверный ряд относительных чисел солнечных пятен, 1849 — 2020 г., т.е. с середины 9 по 24 СЦ. Кроме того, Вольф восстановил среднемесячные значения данного индекса с 1749 г. (пронумерованный ряд чисел Вольфа — W) и среднегодовые с 1700 г. по отрывочным данным отдельных европейских наблюдателей. В работах [1, 2] было проведено сравнение достоверного и восстановленного рядов (обычно для исследований пользуют-

ся слаженными за год среднемесячными числами Вольфа — W^*) и проверена их согласованность, показавшее, что для исследования влияния СА на различные долговременные процессы, как и закономерностей солнечной цикличности, можно пользоваться лишь достоверным рядом, базовая структура которого устойчива на всем интервале наблюдений. Практически все несуразности и артефакты приходится только на восстановленные циклы, а спектральные характеристики этих рядов значимо отличаются. В то же время, как показано в [2], СЦ 8 и 9, примыкающие к достоверным и не противоречащие основным характеристикам СЦ достоверного ряда, можно использовать для ограниченного круга задач, увеличив тем самым статистику до 17 циклов СА (~185 лет).

Вся совокупность достоверных СЦ показывает, что они реализуются в условиях разных режимов генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне Солнца, которые определяются, как показало развитие предыдущего СЦ 23, разным уровнем фоновых значений общего магнитного поля Солнца [3]. При таком подходе на Солнце выявляются эпохи пониженной (СЦ 12 — 16; 24 — и, с большой вероятностью, 4 последующих), повышенной (СЦ 18 — 22 и 10 — 8, 7, 6, последние два гипотетические) СА с переходными периодами между ними (циклы 11—, 17+ и 23—), во время которых примерно за 15 лет, т.е. процессы перехода в новый режим захватывают и часть соседнего СЦ, предыдущего (—) или последующего (+), подготавливают условия наступления соответствующей эпохи СА. Наши знания о первой эпохе пониженной СА, которая длилась с

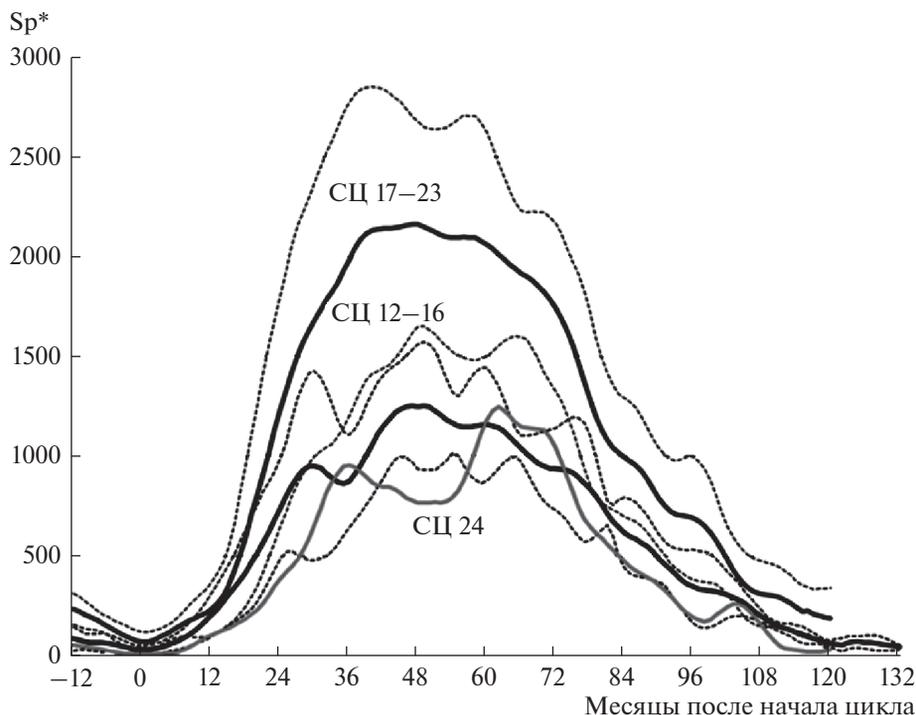


Рис. 1. Эпохи повышенной и пониженной СА в сглаженных за эпохи (по 5 СЦ) площадях пятен: верхняя полужирная линия для эпохи повышенной СА (СЦ 18–22) с добавлением двух переходных циклов (СЦ 17 и 23). Нижняя — для эпохи пониженной СА (СЦ 12–16). Полужирная серая линия — текущий 24 СЦ. Пунктирные линии отражают разброс значений для соответствующих эпох. Преобразованный рисунок из <http://users.telenet.be/j.janssens/SC24web/SC24.html>.

1878 по 1933 г. (5 циклов) ограничивались относительно небольшими числами солнечных пятен, площадями групп пятен, временем прихода межпланетных ударных волн — внезапными импульсами (SI и SSC) и величиной возмущения геомагнитного поля (Aa-индекс с 1868 г.).

На рис. 1 приведены сглаженные средние за соответствующую эпоху площади групп солнечных пятен, которые наглядно показывают принципиальное различие режимов образования пятен в различные эпохи СА. Кривая для 24 СЦ, построена отдельно и четко относит текущий СЦ к эпохе пониженной СА.

В преддверии окончания текущего СЦ представляется интересным провести исследование текущего СЦ в последний период его развития, сравнить его характеристики с соответствующими периодами других СЦ различных эпох. При этом попытаться выявить общие черты и отличия его фазы минимума от фаз минимума СЦ как эпох пониженной СА, к которой он принадлежит, так и других эпох. Это позволит сделать ещё один шаг к более правильному пониманию природы солнечной цикличности и приблизит возможность построения реальной модели солнечной цикличности, а отсюда, и к прогнозу хода развития СА в любую эпоху и любого отдельно взятого СЦ.

2. РАЗВИТИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕКУЩЕГО 24 СЦ В ФАЗЕ МИНИМУМА

Текущий 24 СЦ начался и развивался в условиях, когда после переходного 23 СЦ фоновые значения общего магнитного поля Солнца уменьшились более чем в два раза [4], что привело к полной перестройке физических условий на Солнце, и, как следствие, в гелиосфере, и отразилось на состоянии околоземного космического пространства. Он развивается как цикл низкой величины, вспышечная активность которого существенно ниже всех предыдущих СЦ космической эры, и открывает вторую эпоху пониженной СА [4]. С апреля 2016 г. СА цикла вошла в фазу минимума и, в настоящий момент, проходит период глубокого минимума ($W^* = 1.3$ в январе 2020 г.). Под фазой минимума обычно понимается интервал времени, когда сглаженные значения относительных чисел солнечных пятен остаются в пределах $W^* \leq 30$. Фаза минимума, таким образом, является общей для текущего и последующего СЦ, однако точку минимума принято относить к завершающемуся СЦ. В данной работе мы будем различать временные отрезки фазы минимума от начала цикла до точки $W^* = 30$ — фаза минимума ветви роста, и последующей фазы минимума после максимума цикла от точки $W^* = 30$ и до конца СЦ — фаза минимума ветви спада.

Таблица 1. Основные характеристики высокоактивных групп солнечных пятен в фазах минимума циклов эры космических исследований

СЦ	ПЦМ	АО	Φ_0	L_0	R_{CO}	$S_p \text{ max}$	R, S, G	XRI	$M \pm y$	W^*
19	20.IX.1963	McM6964	N12	310	$\geq R2$	1770	R4/S3/G3		5.5	23.8
20	4.VII.1974	0433	S14	156	$\geq R2$	1334	R4/S3/G3	≥ 41.4	5.8	34.0
21	28.IV.1984	4474	S13	334	R2	2160	R5/S3/G3	21.2	5	49.8
*23	14.IX.2005	10808	S09	229	R2	1430	R5/S3/G3	49.21	5.5	15.5
*23	11.XII.2006	10930	S06	009	R2	680	R4/S3/G4	21.44	6.6	12.1
*24	3.IX.2017	12673	S08	117	R3	1060	R5/S3/G4	18.97	3.5	11.0

СЦ – цикл СА; ПЦМ – дата прохождения центрального меридиана; АО – номер группы пятен по обсерватории McMath и по системе Службы Солнца NOAA США; Φ_0 – гелиоширота АО; L_0 – абсолютная (Кэррингтоновская) гелиодолгота; $S_p \text{ max}$ – максимальная площадь группы солнечных пятен; R, S, G – возмущения в околосолнечном космическом пространстве электромагнитное, возрастание частиц (солнечное протонное событие), геомагнитные бури по 5-бальной шкале; XRI – индекс рентгеновской продуктивности АО; $M \pm y$ – число лет от максимума до события; W^* – сглаженное число Вольфа на момент события.

После 11 лет развития 24 СЦ представляется возможным выявить некоторые принципиальные особенности его развития с СЦ первой эпохи пониженной СА и с циклами с затянутой фазой минимума.

Первая особенность состоит в том, что за первым пиком в ноябре 2011 г. после небольшого, но продолжительного (15 мес.) спада в числе Вольфа, СЦ 24 стал уверенно расти и к апрелю 2014 г. достиг своего максимума ($W^* = 81.9$). Ни в одном СЦ первой эпохи пониженной СА (да и во всей совокупности достоверных СЦ) первый пик, обусловленный в основном группами солнечных пятен Северного полушария Солнца 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 $\Delta W^* \sim 30$. Основной пик сглаженных чисел Вольфа, определивший максимум СЦ 24, был достигнут за счет солнечных пятен Южного полушария.

Второй особенностью стала рекордная для всего достоверного ряда продолжительность ветви роста, которая составила 5.32 г. (табл. 1).

Третьей особенностью стало наименьшее количество больших ($S_p \geq 1000$ миллионных долей полусферы – мдп), очень больших ($S_p \geq 1500$ мдп) и гигантских ($S_p \geq 2000$ мдп) групп пятен не только среди всех СЦ первой эпохи пониженной СА, но и всех СЦ космической эры [4]. На март 2020 г. на Солнца появилось всего 16 больших групп пятен, из них 5 очень больших и 1 гигантская – $S_p = 2700$ мдп (16/5/1), тогда как в 12-ом СЦ таких групп пятен было 23/10/0, в 13 СЦ – 37/9/2, в 14 СЦ – 21/7/2, в 15 СЦ – 21/7/2 и в 16 СЦ – 33/10/3.

Четвертой особенностью стала наименьшая средняя продолжительность существования групп пятен, причем текущий СЦ стал лидером по количеству групп-однодневок. Среднее число пятен в группе, средний размер отдельной взятой группы, а также среднее число регистрируемых пятен и групп являются наименьшими среди всех СЦ космической эры [5].

Основные характеристики развития текущего цикла были подробно рассмотрены в [4], поэтому остановимся на тех из них, которые мы наблюдаем в фазе минимума:

– С самого начала 2016 г. снова наблюдается устойчивое преобладание групп пятен Северного полушария Солнца, которые обеспечили осуществление первого пика в ноябре 2011 г.

– Сглаженные значения потока радиоизлучения на длине волны 10 см (2695 МГц) в фазе минимума ветви спада 24 СЦ упали до значений $69.3 \cdot 10^{-22}$ Вт/м² · Гц в ноябре 2019 г. и приблизились к рекордным значениям фазы минимума 23 СЦ ($68.2 \cdot 10^{-22}$ Вт/м² · Гц в октябре 2009 г.).

– Уменьшение фоновых значений общего магнитного поля Солнца привело к значительному уменьшению магнитных полей всех активных явлений, в том числе в тенях (ядрах) солнечных пятен (~700 Гс от уровня 1998 г.), где величина магнитного поля стабилизировалось на уровне ~2050 Гс.

– Средняя величина магнитного поля корональных дыр в фазе минимума упала до 0.6–1.7 Гс [6], что привело к образованию небольших и слабых по характеристикам магнитных полей соседствующих корональных дыр в ограниченном пространстве (конгломератов), часто занимающих большую площадь, максимальную за всю историю наблюдений, по крайней мере, в линии Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$) – основной спектральной линии служебных наблюдений Солнца за корональными дырами; геоэффективность суммарных высокоскоростных потоков отдельных конгломератов заметно упала по сравнению с “нормальными” корональными дырами и не приводила к заметным рекуррентным геомагнитным возмущениям на средних широтах (малым магнитным бурям), обеспечивая лишь возмущенную геомагнитную обстановку с отдельными суббурями, а в приполярных областях полярные сияния.

– Значимо упало число солнечных протонных событий ($E_{pr} > 10$ МэВ) фазе минимума: 6 против

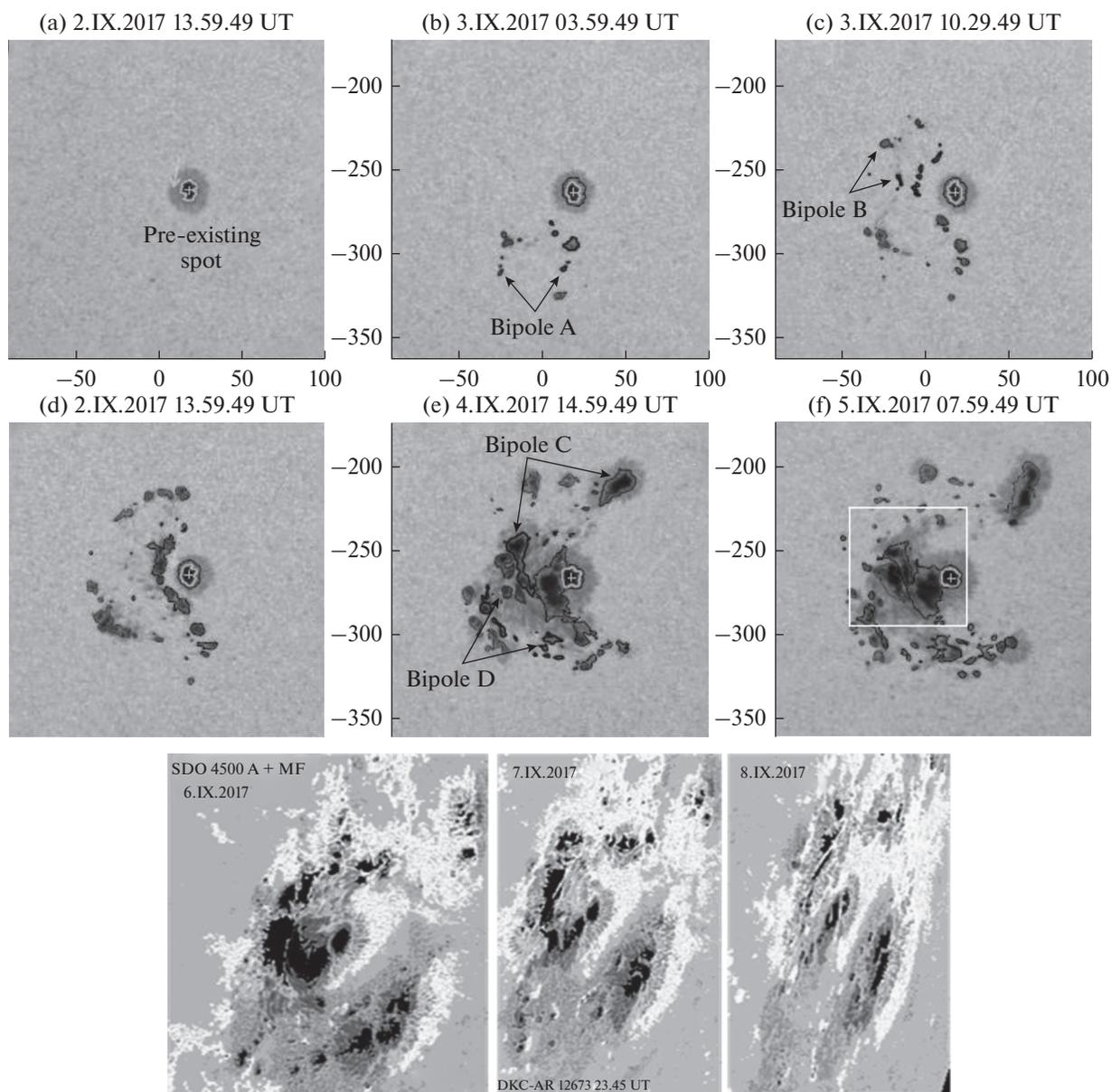


Рис. 2. Активная область сентября 2017 г.: верхний рисунок [7] (a–d): динамика всплытия пятен нового магнитного потока с юга и запада от небольшого старого пятна за 2–3.IX, который привел к первому периоду осуществления больших вспышечных событий; (e–f): всплытие второго нового магнитного потока 4–5.IX; нижний рисунок <http://www.solen.info/solar/> – динамика развития активной области за 6–8.IX.

16 в СЦ 23, причём малых, с потоком протонов ($J \geq 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$) и умеренных ($J \geq 102 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$), 6 против 13, больших ($J \geq 103 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$) в текущем СЦ не было (в 23 - 3). В тоже время, и в 23 СЦ (13.XII.2006 г.), и в 24 СЦ (10.IX.2017 г.) осуществилось лишь по одному протонному событию, которые сопровождалось возрастанием на нейтронных мониторах (вспышка в космических лучах, GLE).

Через 1.5 года после начала фазы минимума, на третьем обороте спокойной небольшой группы пятен южного полушария (площадь 60 мдп на 2.IX) (рис. 2), с 3.IX.2017 начали последовательно всплывать новые магнитные потоки, первый из

которых к 5.IX увеличил площадь группы пятен в 10 раз, а к 8.IX, следующий, довел ее до максимального значения ($S_p = 1060$ мдп). Рис. 2 [7] наглядно представляет все периоды развития данной активной области связанные со всплытием новых магнитных потоков. Как неоднократно бывало в текущем цикле, менее чем через сутки после начала процесса, уже 4–5.IX за 28 ч произошла первая большая протонная вспышка рентгеновского класса M5.5 ($5.5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$) и еще 10 вспышек среднего класса M. В процессе взаимодействия следующего магнитного потока с собственным магнитным полем активной области (6–

Таблица 2. Основные характеристики СЦ большой продолжительности (≥ 11.3 г.)

N	T_0	W_m^*	T_M	T_e	W_M^*	$T_Y\uparrow$	$T_Y\downarrow$	$T_{SC} Y$	$T1_m$	$T2_m$	Sp_{less}
9	1843 VIII	3.2	1848 II	1855 XII	131.6	4.58	7.83	12.42	1.2	23 ^m	>322
10	1855 XII	3.2	1860 II	1867 II	97.9	4.17	7.25	11.42	3.2	34 ^m	402
11	1867 III	5.2	1870 VIII	1878 XI	140.5	3.42	8.50	11.92	2.83	5.41	1025
12	1878 XII	2.2	1883 XII	1890 II	74.6	5.0	6.3	11.3	5.42	4.92	732
13	1890 III	5.0	1894 I	1901 II	87.9	4.5	8.2	12.1	4.92	6.42	937
14	1902 I	2.6	1906 II	1913 VII	64.2	4.1	7.6	11.7	6.42	4.92	1045
20	1964 X	9.6	1968 XI	1976 VI	110.6	4.1	7.8	11.9	3.17	5.75	269
23	1996 VI	8.0	2000 IV	2008 XII	120.7	3.8	8.9	12.7	3.33	5.67	821
24	2009 I	1.7	2014 IV	2020 V-IX	81.9	5.3	5.9	12.3	5.67	4.92	

T_0 – год и месяц начала СЦ; W_m^* – начальная величина сглаженного среднемесячного относительного числа солнечных пятен в данном СЦ; T_M – год и месяц максимума СЦ; W_M^* – величина сглаженного среднемесячного относительного числа солнечных пятен в максимуме СЦ; $T_Y\uparrow$ – длительность ветви роста СЦ в годах; $T_Y\downarrow$ – длительность ветви спада СЦ в годах; T_{SC} – длительность СЦ в годах; $T1_m, T2_m$ – продолжительность фазы минимума до и после точки (месяца) минимума соседних СЦ в годах; Sp_{less} – число беспятенных дней в на ветви спада соответствующего СЦ. Полужирным шрифтом выделены СЦ переходных периодов.

8.IX) за 31 ч осуществились 4 большие вспышки рентгеновских классов X2.2 ($2.2 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²), X9.3 и X1.7, – 6.IX, X1.3, и M7.3 – 7.IX, M8.1 – 8.IX) и 10 вспышек среднего класса – второй период вспышечного энерговыделения. Всплытие третьего нового магнитного потока (8–10.IX) привело еще к одной большой вспышке класса X8.2–10.IX и 4 вспышкам среднего класса во временном интервале 28 ч. Таким образом, в этой активной области, произошли два самых мощных солнечных вспышечных события текущего СЦ – X9.3 и X8.2. Этот период высокой вспышечной активности вызвал в околоземном космическом пространстве солнечные протонные события умеренной и большой интенсивности (S2 и S3), которые продолжались с 4 по 15.IX, одну очень большую и две малые магнитные бури. Надо отметить, что появление подобных экстремально вспышечных активных областей в фазе минимума СЦ довольно частое явление. В прошлом 23-ем цикле подобные высокоактивные группы пятен были отмечены в сентябре 2005 г. (3 года до точки минимума) и в декабре 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. Табл. 1 представляет основные характеристики высокоактивных групп солнечных пятен СЦ эры космических исследований, когда солнечные пятна появляются в условиях изменяющегося фонового значения общего магнитного поля Солнца, в нашем случае, СЦ23 уменьшающегося от уровня присущего эпохе повышенной СА, к уровню пониженной [4]. Для эпохи пониженной СА у нас пока нет статистики, так как текущий цикл – первый цикл наступившей эпохи, но эта закономерность, как видно из табл. 1, выполняется. Исследование выборки высокоактивных областей вблизи минимума цикла показало, что такие активные области, генераторы мощных

вспышек, всегда (в рамках существующей статистики) начинают работать на втором или третьем оборотах, т.е. они после “созревания” становятся “центрами” генерации высокоэффективных новых магнитных потоков. В них, на данной выборке, всегда осуществляется несколько отдельных независимых интервалов всплытия значимых магнитных потоков, которые обеспечивают несколько периодов вспышечного энерговыделения (от 2 до 4) разнесенных по времени от 1 до 10 сут. Такие активные области появлялись преимущественно в южном полушарии в интервале гелиоширот S14–S06 и лишь одна – в СЦ 19 появилась на N12.

3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦ С ЗАТЯНУТЫМИ ФАЗАМИ МИНИМУМА

Особый интерес для понимания закономерностей внутреннего развития СЦ и подходов к возможности прогнозирования характеристик отдельных составляющих, например, ветвей спада представляет исследование затянутых по времени фаз минимумов. По длительности, все достоверные СЦ можно разделить на два класса (табл. 2). В первый класс входят циклы, продолжительность которых превышает 11.3 года (135 месяцев) – длительные СЦ. Во второй класс вошли СЦ, продолжительность которых значительно меньше 11 лет. Надо отметить, что начиная с СЦ 15 (т.е. практически весь XX век) продолжительность СЦ, включая 20 и 23 СЦ, была в среднем 10.2 года. Тот факт, что СЦ 15 и 16 – последние циклы первой эпохи пониженной СА, были значимо короче предыдущих трех, может говорить о более длительной (>1.5 цикла) подготовке перехода (СЦ 17) к эпохе повышенной СА, начала подготовки изменений режима пятнообразования в конвективной зоне Солнца в последних СЦ эпохи пониженной СА, или о возможном несовершенстве

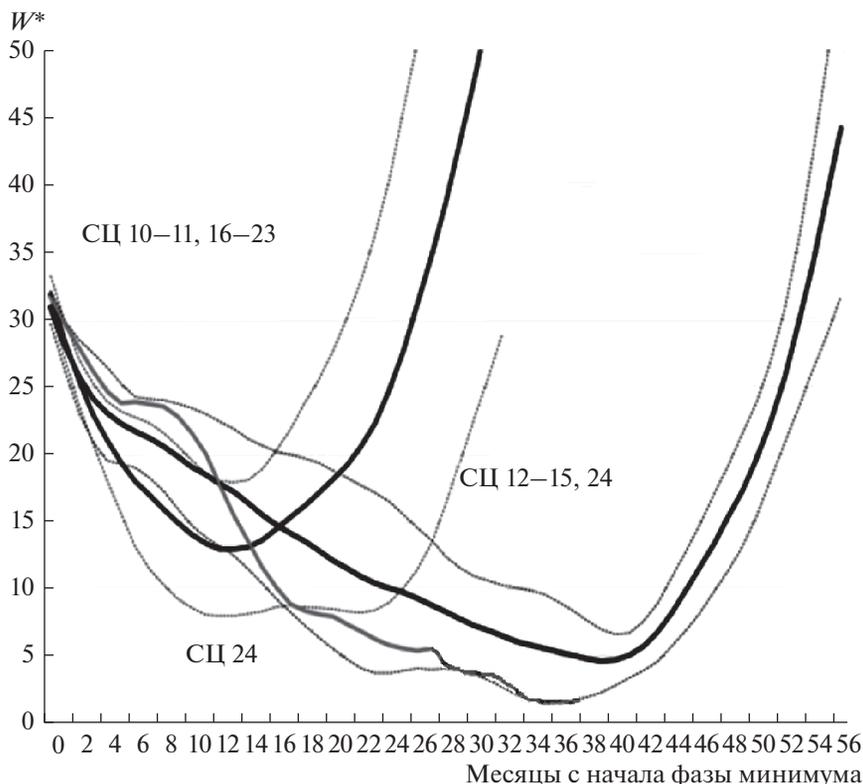


Рис. 3. Распределение длительности фаз минимума достоверных СЦ. Левая полуциркульная кривая для СЦ эпох повышенной СА, двух переходных (11, 23) и СЦ 16 из первой эпохи повышенной СА. Правая полуциркульная кривая для СЦ эпох пониженной СА. Полуциркульная серая кривая – 24 СЦ. Преобразованный рисунок из <http://users.telenet.be/j.janssens/SC24web/SC24.html#SC2425minimum>.

наблюдений относительного числа солнечных пятен в XIX–начале XX века (маловероятно).

Из рис. 3 следует, что по длительности фазы минимума ветви спада, как и по темпу спада, все достоверные СЦ распадаются на две группы: к первой группе достоверных СЦ относятся все циклы XIX века (СЦ 10–14) и СЦ 20 и 23, которые осуществились в XX и XXI веках с длительностью спада W^* ($39+8/-5$) месяцев. По принадлежности к эпохам СА циклы первой группы распределились следующим образом:

- три из них составляют начальные СЦ первой эпохи пониженной СА (12–14);

- два (из трех) являются СЦ переходных периодов (11 и 23), причем оба осуществляли перестройку общего магнитного поля к эпохам пониженной СА;

- и два цикла средней величины эпох повышенной СА (СЦ 10 и 20).

Вторую группу составляют СЦ длительностью ≤ 10.5 г. (125 мес.) и характерным временем спада ($13+10/-3$) месяцев, в которую входят:

- все высокие СЦ (18–22) эпохи повышенной СА и СЦ 16 из первой эпохи пониженной СА;

- переходной СЦ 17 от эпохи пониженной к повышенной СА.

Сроки начала следующего СЦ, в основном определяются высотой (strength) нового СЦ: более активные (высокие) циклы, как правило, начинают свой рост раньше (через 8–15 мес.), хотя было два заметных исключения: СЦ 17 и 22 – оба, один полностью и один частично, приходятся на периоды перестройки общего магнитного поля Солнца к новым эпохам. Переходные циклы к эпохам пониженной СА, как и сами циклы эпохи пониженной СА, относятся к циклам большой длительности именно за счет затянутой фазы минимума ветви спада. Средний интервал длительности фазы минимума для таких циклов 41–47 мес., однако СЦ 13 стал экстремально затянутым – 57 мес.

Основной особенностью СЦ 20 и 10 эпох повышенной СА, попавших в первую группу, является затянутая фаза спада до начала фазы минимума и короткая сама фаза минимума (19 и 20 мес.). Сравнительно небольшая длительность интервала фазы минимума (19–22 мес.) – характерная черта всех СЦ эпох повышенной СА. То есть даже для циклов большой длительности эпох повышенной СА сохраняется правило короткой фазы минимума ветви спада.

В табл. 2 приводятся основные характеристики СЦ с затянутыми фазами минимумов ветвей спада. Такие СЦ на данной статистике наблюда-

лись между переходными и начальными низкими СЦ открывающими эпохи пониженной СА (СЦ 11–12 и 23–24), между циклами пониженной эпохи СА (12–13, 13–14 и 14–15) а также между средним и высоким СЦ (20–21) и двумя формально средними (9–10) в эпохах повышенной СА. Обращает на себя внимание, что СЦ 9, попадает в эту выборку за счет аномально затянутой по времени фазы спада (интервала времени $T_{\max} - T_{30}^*$). Так как СЦ 9 условно достоверный цикл, возможно, что это эффект “плохих” данных.

Для СЦ эпох повышенной СА и переходных циклов сравнительно короткая фаза минимума ветви роста (T_{1m}), определяет длинную фазу минимума ветви спада (T_{2m}), причем для СЦ 11 и 23 она одна из самых протяженных и уступает только СЦ 13. Для трех из пяти СЦ эпохи пониженной СА это правило также справедливо, но в 13 и 16 СЦ оно нарушается и фаза минимума ветви роста превосходит фазу минимума ветви спада. При этом надо иметь ввиду, что для всех достоверных СЦ ветвь роста в 1.2–2 раза короче по времени, чем ветвь спада

Различие физических характеристик эпох пониженной и повышенной СА, как и следовало ожидать, отразилось и в количестве беспятенных дней на видимом диске Солнца в минимумах СЦ. Однако прямой прогностической связи между количеством беспятенных дней и характеристиками последующего СЦ выявить пока не удалось [8, 9]. Для циклов эпох повышенной СА средние значения (~300 беспятенных дней) больше чем вдвое отличаются от СЦ эпох пониженной (~800). В первых количество беспятенных дней изменяется от 221 в СЦ 19 до 444 в СЦ 18, а в последних они изменяются от 526 в СЦ 15 до 1045 в СЦ 14. Эволюцию, динамику роста и количество беспятенных дней достоверных циклов СА можно посмотреть по адресу (<http://sidc.oma.be/silso/spotless>) на сравнительно недавно открытой странице беспятенных дней в SIDS – RWS Belgium (Аналитический центр по воздействию Солнца на околоземное космическое пространство). Из рисунков, в частности, раздел Evolution of spotless days in SC24–25, следует, что в настоящее время (июль 2020 г.) кривая роста беспятенных дней остается почти параллельной кривой среднего развития циклов эпохи пониженной СА. Быстрый рост беспятенных дней текущего минимума почти совпадает с таковым для предыдущего минимума СЦ 23, хотя в 2019 г. количество беспятенных дней (281) уже превысило 2008 г. и стало 4 за всю историю достоверных наблюдений солнечных пятен. Только 3 года дали больше беспятенных дней, чем 2019 год: 1878, 1901 и 1913 – год, который является рекордсменом с 311 беспятенными днями. Период с 14.XI–23.XII.2019 г. (39 сут.) является одним самых продолжительных с начала ежедневных сол-

нечных наблюдений в 1849 г. Во время фазы минимума СЦ 22–23 с 13.IX–24.X. 1996 г. Солнце было беспятенным в течение 42 дней подряд (8 место), а рекордсменом стал период 8.04. – 8.07.1913 г. – 92 суток – таблица из раздела (Periods of spotless days (≥ 30 days) since 1849) на той же странице где приводятся все периоды с 30 или более последовательными беспятенными днями. С 1849 года прошло 114 лет (включая 2019 г.), по крайней мере, с одним беспятенным днем.

В случае сохранения текущего сценария, можно ожидать минимума СЦ 24 до мая 2020 года (± 5 мес.). В табл. показаны все периоды с 30 или более последовательными беспятенными днями.

На последнем графике этой страницы в разделе Number of spotless days vs. Solar Cycle amplitude показана зависимость количества беспятенных дней за фазу минимума ветви спада соответствующего СЦ (шкала справа) от ежегодного накопленного числа солнечных пятен (W_y) с 1818 г. (обратная шкала слева). Во время фазы минимума СЦ 23 было 817 беспятенных дней, и эта точка данных проставлена в 2008 г., в год минимума СЦ. В целом этот график хорошо показывает, что циклу с низкой амплитудой предшествует минимум СЦ с большим количеством беспятенных дней, и наоборот, что является хорошей иллюстрацией справедливости выделения различных эпох СА. Тем не менее, есть некоторые заметные исключения, такие как SC16 и SC20 (см. выше). Синяя точка в правом нижнем углу представляет количество беспятенных дней графика (600) на момент обновления графика, а на март 2020 г. это число достигло уже 735. Очевидно, что можно сделать вывод, что следующий СЦ не может быть высоким и, с большой вероятностью, учитывая правило Гневнышева-Оля должен быть средних размеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сказанного выше следует, что текущий цикл развивается по сценарию типичному для достоверных СЦ эпохи пониженной СА и в достаточной мере похож на первый цикл (12) первой эпохи пониженной СА. Некоторые особенности развития последних трех циклов СА и характеристики текущего СЦ, а также картина развития активных явлений с пониженными величинами магнитных полей, подтверждают произошедшую смену режима генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца. Солнце вступило в период малых и средних СЦ, который по наблюдаемому устойчивому сценарию солнечной цикличности должен продлиться 5 циклов (~55 лет), образуя очередную (вторую) эпоху пониженной СА, в которой последующие 4 СЦ будут поочередно циклами средней и низкой величины. Следствием наблюдаемого дефицита вспышеч-

но-активных областей будет значимое уменьшение числа сильных спорадических геомагнитных возмущений, больших протонных событий, а очень большие и экстремальные вспышечные события будут достаточно редки.

По длительности, все достоверные СЦ можно разделить на два класса. В первый класс входят циклы, продолжительность которых превышает 11.3 г. (135 мес.). Это СЦ низкой и средней величины, образующие эпохи пониженной СА (кроме СЦ 16), два переходных СЦ 11 и 23, и СЦ средней величины эпох повышенной СА. Если для СЦ эпохи пониженной СА и переходных к эпохам пониженной СА (СЦ 11 и 22) удлинение времени циклов происходит из-за затянутой фазы минимума ветви спада, то для СЦ эпохи повышенной СА это удлинение происходит за счет длительности ветви спада от максимума до точки минимума. Необходимо отметить, что в переходных циклах к эпохам пониженной СА, протяженность фаз минимума самые протяженные и уступают только СЦ 13.

Во второй класс вошли СЦ, продолжительность которых не превосходит 10.5 г. (125 мес.) с характерным временем спада (13+10/−3) мес. Это все высокие СЦ эпохи повышенной СА, СЦ 16, с которого началась подготовка к переходу от эпохи пониженной к повышенной СА и сам переходный цикл 17. В этих циклах ветвь спада формируется из сравнительно длинной по времени ветви спада от максимума до точки начала фазы минимума ($W^* = 30$) и короткой самой фазы минимума.

Надо отметить, что уже сейчас, по данным на январь 2020 г., текущий 24 СЦ достиг самого низкого для достоверных СЦ значения сглаженного числа Вольфа $W^* = 1.3$ и падение продолжается.

Так как внутри эпох СА, без исключений выдерживалось правило Гневышева–Оля, следующий 25 СЦ должен быть средней величины, выше текущего ($W^* \sim 100-120$), но ни в коей мере не большим и не низким. Вероятная длительность ветви спада текущего цикла ~6 лет, самого цикла ~12 лет. Точка минимума ожидается до середины 2020 г.

Таким образом, текущий 24 СЦ по своим характеристикам в фазе минимума является типичным представителем СЦ эпохи пониженной СА, со всеми наглядными проявлениями спада активности как в пятнообразовательной деятельности, так и в фоновых характеристиках всех проявлений магнитных структур, в том числе, значимом уменьшением магнитных полей в корональных дырах, что повлекло за собой уменьшение их реальной численности и геоэффективности, как на

протяжении всего цикла, так и в фазе минимума. Это даёт основание считать, что текущий цикл резко отличается от достаточно хорошо нам известных СЦ космической эры, которая началась в эпоху повышенной СА, прошла через переходной СЦ 23. Таким образом, открывается новая страница в изучении СА со своими условиями проявлений всех магнитных явлений на Солнце, во внутренней гелиосфере, в околоземном пространстве, со своими значениями фоновых характеристик и новых реальных сценариев развития, казалось бы хорошо нам известных, проявлений космической погоды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ишков В.Н., Шубаев И.Г.* Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Изв. РАН. Сер. физическая. 2006. Т. 70. № 10. С. 1439.
2. *Shibaev I., Ishkov V.* Investigation of the Statistical Characteristics of Wolf Numbers Reliable Series: Signs of Solar Cycles Likelihood // 7th Scientific Conf. "Space, Ecology, Safety" – SES 2011. Sofia, Bulgaria. 2012. P. 297.
3. *Ishkov V.N.* Solar sunspot-forming activity and its development on the reliable Wolf numbers series. Variability of the Sun and Sun-like Stars: from Asteroseismology to Space Weather. EDP Sciences Proceedings. 2018. P. 109–118. https://international.scholarvox.com/catalog/book/88855582?_locale=en
4. *Ишков В.Н.* Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // Геомаг. и Аэрономия. 2018. Т. 58. № 6. С. 785–800. <https://doi.org/10.1134/S0016794018060056>
5. *Откидывчев П.А., Скорбеж Н.Н.* Особенности 24 цикла солнечной активности и их связь с общими закономерностями 19–23 циклов // Труды Пулковской конф. "Солнечная и солнечно-земная физика – 2013". Изд. ВВМ. Санкт-Петербург. 2013. С. 187–190.
6. *Heinemann S.G., Temmer M., Heinemann N. et al.* Statistical Analysis and Catalog of Non-polar Coronal Holes Covering the SDO-Era Using CATCH // Sol. Phys. 2019. V. 294. P. 144. <https://doi.org/10.1007/s11207-019-1539-y>
7. *Yang S., Zhang J., Zhu X., Song Q.* Block-Induced complex structures building the flare-productive solar active region 12673 // Astroph. J. Lett. 849:L21. 2017. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9476>
8. *Carrasco V., Vaquero J., Gallego M.* Analysing Spotless Days as Predictors of Solar Activity from the New Sunspot Number // Sol Phys 2017. V. 292. P. 154. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1172-6>
9. *Wilson R. Hathaway D.* On The Relationship Between Spotless Days and the Sunspot Cycle: A Supplement. NASA/TP–2006–214601. 56 p. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070018264> 2020-03-09T15:04:17+00:00Z