

ТЕКУЩИЙ МОМЕНТ РАЗВИТИЯ 25 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: ФАЗА МАКСИМУМА

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия

CURRENT MOMENT DEVELOPMENT OF THE 25 SOLAR CYCLE DEVELOPMENT: THE PHASE OF MAXIMUM

Ishkov V.N.

IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia

The epoch of lowered solar activity, the 2nd cycle of which is the current 25, is developing according to the observational rules and patterns of the solar cyclicity scenario. After the low-altitude solar cycle 24, the current cycle, which began in January 2020, as expected, entered the family of medium-sized solar cycles. The rate of its development as of October 2024 (58 months of development) corresponds to the course of development of a medium-sized SC and is near the maximum, which is expected in June - August 2024 with a value of $W^ = \sim 095$ (~ 143 in the v2 system).*

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-139-144>

1. Главным результатом исследования достоверного ряда (1849–2024 г.) [1] солнечных пятен стал сценарий устойчивого развития солнечной цикличности в последние ~190 лет [2]. Данный сценарий предусматривает регулярную смену уровня пятнообразовательной деятельности при переходе от эпох повышенной СА к эпохам пониженной и, наоборот, с переходными между ними СЦ в зависимости от трёх различных режимов генерации общего магнитного поля (МП) Солнца, длительностью ~5 СЦ. Полный цикл реализации всех 3-х режимов занимает 140–150 лет. Режим пониженного уровня генерации общего МП Солнца реализует СЦ низкой и средней величины, а режим повышенного – образует только высокие и средние СЦ.

Недавно предложена новая концепция солнечной цикличности, опубликованная в обзоре [3], которая показывает, как изменялись и уточнялись наши знания о структуре СА по мере освоения новых видов наблюдений в развивающейся Службе Солнца. Регулярные изменения числа солнечных пятен за интервалы 9–13 лет рассматривались как основной СЦ. С появлением регулярных наблюдений магнитных полей стало понятным, что физический 22-летний (два 11-летних) СЦ, связан с динамикой общего магнитного поля Солнца, с обязательной переполусовкой в максимуме каждого из его составляющих. Регулярные магнитные и рентгеновские наблюдения более мелких магнитных структур (биполярных магнитных областей: короткоживущих эфемерных АО, ярких рентгеновских точек), и изу-

чение их характеристик позволило расширить понятие СЦ. Новый подход к пониманию солнечной цикличности рассматривает сочетание двух 22-летних СЦ с их большим количеством и одновременным существованием более мелких биполярных магнитных структур в разных отдельных, но соседних широтных полосах, теперь понимается как фундаментальный цикл СА. Ориентации большинства биполярных магнитных областей в двух соседних полосах отличаются друг от друга на $\sim 180^\circ$. Обе полосы непрерывно дрейфуют из более высоких широт в более низкие, как это было известно для 11-летних СЦ. Однако смена полярности для большинства мелких магнитных структур происходит в начале каждого 22-летнего цикла и на более высоких широтах, чем в циклах солнечных пятен. Надо иметь в виду, что новый взгляд на СЦ появился на стыке двух эпох СА, при переходе от эпохи повышенной к эпохе пониженной СА и дальнейшие наблюдения, на наш взгляд, внесут существенные уточнения в эту концепцию. Однако, ясно, что мы поэтапно приближаемся к понятию эпох СА, которые полностью определяются величиной фоновых (затравочных) значений общего магнитного поля Солнца внутри фундаментальных СЦ.

2. Развитие текущего 25 цикла солнечной активности (СА) второго цикла второй эпохи пониженной СА (58 мес.) подтверждает установленные наблюдательные закономерности и правила солнечной цикличности и развивается по сценарию, типичному для солнечных циклов (СЦ), составляющих эпохи СА: внутри каждой из эпох на достоверном интервале наблюдений СА безусловно выполнялись все наблюдательные правила, например, правило Гневешева-Оля, по которому нечётный СЦ должен быть больше предыдущего чётного. Поэтому и внутри современной эпохи пониженной СА, предыдущий СЦ24 и следующий СЦ26 должны быть низкими ($W^* < 90$).

3. Текущий СЦ25 начался в январе 2020 г., является 2-м компонентом физического 22-летнего СЦ(24–25) и по ходу развития (4.75 г.) вошёл в семейство СЦ средней величины [4]. Интересно отметить, что на статистике достоверных циклов на Солнце, все СЦ средней величины эпох пониженной СА и переходных периодов (кроме СЦ11) были нечётными, а подобные СЦ эпох повышенной СА – чётными. На рис.1 (преобразованный рисунок из [http://www.solen.info/solar/images/comparison_similar_cycles.png]) дается ход развития текущего цикла в семействе СЦ, обеих достоверных эпох пониженной СА и переходного СЦ23 (величины в мес. после начала СЦ). Физический (магнитный) 22-летний цикл СА связан с полным оборотом полюсов дипольной (основной) компоненты общего магнитного поля Солнца, совпадающими с реальными полюсами Солнца. За рассматриваемый период СА прошла полуфазу минимума ветви роста, длительность которой составила почти 2 года, что является рекордом для СЦ средней величины. В ноябре 2023 г. СЦ25 вошел в фазу максимума. Под фазой максимума здесь понимается отрезок времени, когда значения относительного

числа солнечных пятен (W^*) находятся в пределах 15% от стандартно сглаженного значения в максимуме цикла ($W^*_{\max}$).

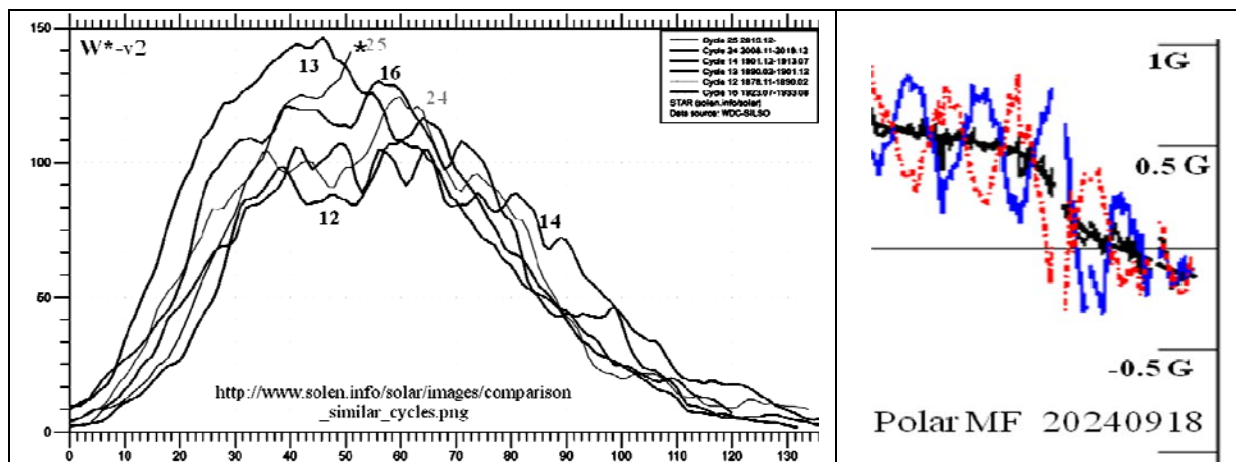


Рис. 1.

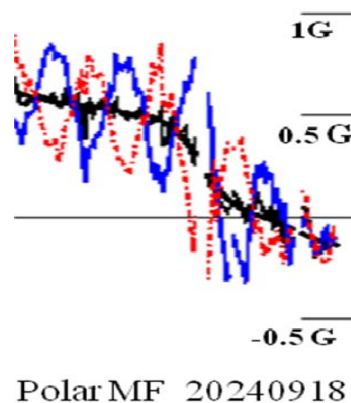


Рис. 2.

Наиболее значимым наблюдательным событием в фазе максимума является процесс переполюсовки общего магнитного поля Солнца, ход которого можно отслеживать по служебным наблюдениям солнечной обсерватории Wilcox (USA). Процесс переполюсовки в текущем СЦ (рис. 2) начался в июле 2023 г. с северного полушария и продолжался до 07.2024. На рис. 2 представлены вариации полярного магнитного поля ветви роста текущего СЦ на северном полюсе Солнца (тонкая линия), на южном (тонкая точечная линия и суммарные (толстая линия). Преобразованный рисунок из [http://wso.stanford.edu/gifs/Polar.gif]

Особенностью фазы максимума текущего СЦ25 является резкое увеличение пятнообразовательной активности и количества вспышечно-активных групп пятен и, соответственно, вспышечной активности, в том числе больших (рентгеновского класса $\geq M5$) солнечных вспышек после ноября 2023 г. и до настоящего времени.

Этот резкий рост вспышечной активности за сравнительно короткий срок по количеству значимых вспышек ($\geq M1$) поставил текущий СЦ выше предыдущего низкого СЦ24 и переходного между эпохами СЦ23. На начало октября 2024 г. СЦ25 произвел 1080 вспышек средних классов M1–M4, 179 больших ($M \geq 5$), из которых 62 были класса X. Почти 11% из этих 1259 вспышек были произведены в мае 2024 г., что можно сравнить лишь с мартом 1991 г., 179 против 143, соответственно.

4. Рассмотрим основные характеристики текущего цикла СА:

- формальное начало текущего цикла СА – январь 2020 г., и начальное значение сглаженного числа Вольфа $W^*_{\min} = 1.3$ (1.8 в системе V2);
- последняя группа пятен старого цикла (AR12766 в системе службы Солнца NOAA) отмечена в июле 2020 г., и в каждом обороте количество активных областей (АО) неизменно нарастало [5];

- количество беспятенных дней в полуфазе минимума – 273, что является нормой для СЦ средней величины;
- первые группы пятен появились в северном полушарии (N43) в августе 2017 г., а в южном (S37) только в январе 2018 г., что характерно для большинства достоверных СЦ, за 1–1.5 г. до точки минимума [5]; первая устойчивая (≥ 7 сут.) группа пятен образовалась 24.01.2020, а следующая только 17.10;
- начало фазы роста – ноябрь 2021 г., когда видимый диск Солнца одновременно проходили сразу 3 активные группы пятен среднего размера с площадями >300 м.д.п.;
- появление первой большой спокойной ($S_p = 1000$ мдп) группы солнечных пятен – ноябрь 2020, а первой очень большой ($S_p \geq 1500$ мдп) в северном полушарии Солнца – начало ноября 2021 года;
- до октября 2020 г. асимметрии пятнообразовательной деятельности по полушариям практически не было, затем АО южного полушария стали преобладать, но уже к концу 2021 г. стало преобладать северное полушарие, однако коэффициент асимметрии оставался низким [5]; реально только с августа 2024 г. АО южного полушария стали значимо преобладать;
- вспышечная активность СЦ25 уже превосходит по количеству больших солнечных вспышек СЦ23 и 24, соответственно 179, 145 и 73, но значительно ниже, чем в СЦ21–22 эпохи повышенной СА (соответственно 222 и 383);
- переполюсовка прошла довольно быстро и заняла интервал в 1 год;
- сглаженные суточные значения корональных выбросов вещества (КВВ) и их абсолютные величины в 2024 г. сравнимы с предыдущими СЦ (около 6/сут), а средняя фазовая скорость в СЦ23–25 примерно равны; сглаженная дневная скорость КВВ достигла максимума в 6,1/сут. в мае 2023 года, через 41 мес. с момента сглаженного минимума их скорости. Это значение превышает максимумы, зарегистрированные в СЦ 23 и 24 (соответственно 5,0 против 5,9/сут.). Абсолютное месячное значение КВВ достигло максимума в феврале 2023 г. (7,8/сут.), самого высокого с момента запуска SOHO; число и характеристики межпланетных КВВ в СЦ25 аналогично таковому в СЦ24, но больше, чем в СЦ23 в ~ 2 раза [6];
- по количеству солнечных протонных событий (СПС) с потоками частиц >10 пр/см²·с sr ($E \geq 10$ МэВ) за одинаковый период развития последних 3 СЦ, текущий СЦ заметно опережает СЦ24 (40) и СЦ23 (24). Это указывает на сохранении во всем 7 физическом СЦ облегчённого выхода протонов во вспышечных событиях. Первое СПС произошло 29.05.2021 г. (15 пр/см²·с sr); на рассматриваемый период СЦ25 произвел 34 СПС, из которых 17 были класса $\geq S2$ ($3 > S3$). Самое интенсивное (1812 пр/см²·с sr) 9–10.10.2024 г. было связано со вспышкой X1.4 в AR13842 и с приходом к Земле межпланетного КВВ от этой вспышки. Всего лишь 2 GLE наблюдалось за это время. Первое было связано со вспышкой X1.0 28 октября

2021 г., связанное с ним СПС лишь класса S1 ($29 \text{ pr/cm}^2 \cdot \text{s sr}$) но сопровождалось увеличением потока более энергичных протонов, как и 2-е GLE№74 11.05.2024 г. и было связано со вспышкой X5.8 в AR13664 ($S1-116 \text{ pr/cm}^2 \cdot \text{s sr}$).

– в геомагнитном поле зарегистрировано более 60 магнитных бурь (МБ): 1 экстремальная, 1 очень большая, 10 больших и 16 умеренных. Ap-index достиг своего минимума в апреле 2020 г. через 4 месяца после точки минимума. Экстремальная МБ 10–11.05 2024 г. привела к тому, что средне-месячное значение Ap в мае 2024 г. достигло 23,56 нТл, самого высокого значения после января 2005 года (23,74 нТл). По новостным выпускам [<https://www.stce.be/news/welcome.html>] во время сильных МБ 26–27.02. 2023 г., 23–24.03 2023 г. ($K_p = 8_0$), 23–24.04 ($K_p = 8_+$) и 5.11.2023 г. ($K_p = 7_+$), пилоты (гражданская авиация) сообщали о проблемах со спутниковыми навигационными системами, потере 38 спутников Starlink из-за роста плотности атмосферы на орбите высотой 210 км [7], отмечались нарушения в сети ГЛОНАС, непредсказуемое поведение беспилотников. Экстремальная МБ 10–11 мая 2024 г., (K_p -индекс = $9_0 - G5$), была 1-ым событием такого класса после МБ 29–30.10 2003 г. Ежедневный обзор состояния ОКП [Spaceweather.com] сообщал, что полярные сияния наблюдались на низких широтах ($\pm 25^\circ$), в Мексике, на Гавайях и в Новой Каледонии. По Dst-индексу наиболее интенсивные МБ в текущем СЦ произошли 23–24.03 (–163 нТ), 23–24.04 (–213 нТ), 5.11 (–163 нТ) 2023 г., 12.08 (–188 нТ) и 10–11.10. 2024 года (–335 нТ). В экстремальной МБ 10–11.05. 2024 года, Dst-индекс достиг –412 нТл, что вывело ее на 7 место с момента начала измерений в 1957 году, и на 2-ое место после 20.11.2003 г. (–422 нТ), Рекордсменом МБ по Dst-индексу является знаменитая экстремальная МБ 13–14.03.1989 г. (–589 нТ).

Развитие текущего СЦ25 подтверждает наблюдаемый дефицит активных явлений до начала 2024 г., после чего он практически исчез для больших солнечных вспышек: количество спорадических возмущений ОКП всех видов значительно увеличилось, в том числе и возмущений большой интенсивности. За 10 мес. текущего года на Солнце осуществилось 5 вспышечных событий рентгеновских классов $X \geq 5$, 45 – классов $X1-X4.9$ 45; 3 СПС категории S4 и 17 – S3; одна экстремальная G5 МБ и одна очень большая класса G4. Однако геоэффективность корональных дыр, в полной мере, так и не восстановилась.

До конца 2024 г. текущий СЦ должен достичь максимума, если судить по динамике развития фазы роста, в июне–сентябре 2024 г. $W^* = 100 \pm 10$ (165 ± 17 в системе V2). Точку минимума текущего цикла следует ожидать в первой половине 2031. За развитием текущего СЦ можно следить на странице <http://www.izmiran.ru/saf>, где каждый первый понедельник месяца публикуются основные индексы солнечной и геомагнитной активности и

все изменения в пятнообразовательной и вспышечной деятельности Солнца.

Итак, прошедший СЦ24 и начальный этап развития СЦ25 подтверждают, что СА вступила во 2-ую достоверную эпоху пониженной СА: последующие 5 СЦ должны чередоваться, быть низкой и средней величины и в течение ~ 55 лет мы не будем наблюдать высоких ($W^* > 145$ v1) циклов СА.

Литература

1. *Ишков В.Н. Шибяев И.Г.* Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Известия РАН, серия физическая, 2006, т. 70, № 10, с. 1439-1442.
2. *Ishkov, V.N.* Solar sunspot-forming activity and its development on the reliable Wolf numbers series // in book "Variability of the Sun and Sun-like Stars: from Asteroseismology to Space Weather". eds J. Rozelot, E. Babaev, EDP Sciences Proceedings. – 2018. p.109. https://international.scholarvox.com/catalog/book/88855582?_locale=en
3. *Martin S.F.* Observations key to understanding solar cycles: a review // Front. Astron. Space Sci., 2024, 10:1177097. doi: 10.3389/fspas.2023.1177097
4. *Ishkov V.N.* Medium-Sized Solar Cycles in Different Epochs of Solar Activity // Geomagnetism and Aeronomy, 2023, V.63, No.7, P. 162–168. DOI: 10.1134/S0016793223070101. ISSN 0016-7932,
5. *Язев С.А., Исаева Е.С. Хос-Эрдэнэ Б.* 25-й цикл солнечной активности: первые три года // Солнечно-земная физика, 2023, 9, №3, с. 5–11.
6. *Gopalswamy, N. et al.* What Do Halo CMEs Tell Us about Solar Cycle 25? // The Astroph. J. Letters, 2023, 952:L13 (8pp), DOI 10.3847/2041-8213/acdde2.
7. *Kataoka R., Shiota D., Fujiwara H., et al.* Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022. // J. Space Weather Space Clim., 2022, 12, 41. <https://doi.org/10.1051/swsc/2022034>.