

## О 23–24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

М. Б. Крайнев

*Обсуждается поведение характеристик двух основных ветвей (тороидальной и полоидальной) солнечной активности в 23-ем и в начале 24-го солнечных циклов (СЦ). Проводится сравнение характеристик СЦ 23 с характеристиками предыдущих циклов и рассмотрены возможные варианты развития текущего СЦ 24.*

**Ключевые слова:** Солнце, цикл солнечной активности, особенности солнечного цикла 23, развитие солнечного цикла 24.

Закончившийся недавно (конец 2008 г.) 23 цикл активности Солнца был необычен по многим параметрам. Особенно аномальной была заключительная часть цикла 23 и начало СЦ 24, очень глубокий и продолжительный минимум активности (см., напр., [7]). Часто интервал времени низкой активности в конце  $i$ -го цикла и начале следующего,  $(i + 1)$ -го, называют фазой минимума  $(i + 1)$ -го цикла. Поэтому будем называть период 2007–2010 гг. фазой минимума 24-го цикла солнечной активности (СА). На верхней и средней панелях рис. 1 показано поведение во времени двух ветвей СА: 1) тороидальной (связанной с компонентой  $B_\varphi$  индукции магнитного поля на средних широтах фотосферы Солнца и наблюдаемой по характеристикам активных областей и пятен) и 2) полоидальной (связанной с компонентами  $B_{r,\theta}$  магнитного поля на фотосфере Солнца и наблюдаемой также по числу полярных факелов).

Обычно при рассмотрении особенностей СЦ 23 указывают очевидные из верхней панели рис. 1 особенности этого цикла по сравнению с предыдущими по активности тороидальной ветви: большая длительность и низкий уровень на заключительной стадии. Мы обращаем внимание на заметные на средней и нижней панелях рис. 1 особенности полоидальной ветви на спаде СЦ 23 и в минимуме СЦ 24. Максимальное значение  $B_{\text{ls}}^{\text{pol}}$  в СЦ 23 существенно (в  $\approx 1.5$ –2 раза) меньше, чем в СЦ 21–22. По данным обсерватории Маунт Вилсон число полярных факелов в СЦ 23 — наименьшее за всё время измерений (с 1906 г., [6]). Однако число полярных факелов по данным горной астрономической станции (ГАС) ГАО РАН противоречит этому: по максимальному числу

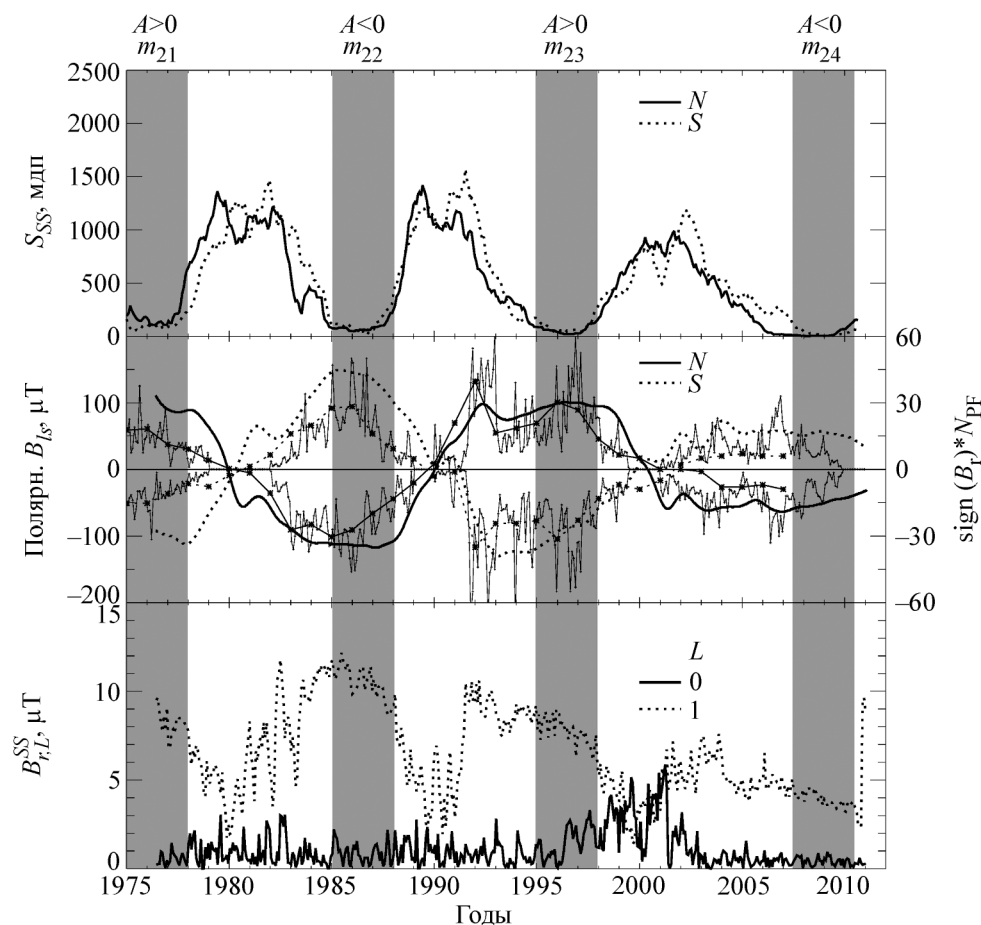


Рис. 1: Две ветви активности в СЦ 21–24 в обоих полушариях Солнца. Затемнёнными вертикальными полосами отмечены периоды минимума тороидальной солнечной активности, а выше указана полярность  $A$  (знак радиальной составляющей высокоширотного магнитного поля в северном полушарии). Верхняя панель: Площадь солнечных пятен [11], сглаженная с периодом 1 год. Средняя панель: Компонента вдоль луча зрения высокоширотного магнитного поля ([12], гладкие жирные линии – сплошные для северного и пунктирные для южного полушариев); число полярных факелов, взятое со знаком радиальной компоненты поля в соответствующем полушарии, по данным: обсерватории Маунт Вилсон ([6]; сплошные и пунктирные линии, соединяющие звёздочки) и ГАС ГАО РАН (Кисловодск, [10]; изрезанные линии без значков). Нижняя панель: Вклад монополярной ( $L = 0$ ) и дипольной ( $L = 1$ ) гармоник в магнитное поле на поверхности источника гелиосферного магнитного поля [12].

полярных факелов СЦ 23 аналогичен СЦ 19 [10]. Также видно, что по данным ГАС ГАО число полярных факелов в обоих полушариях резко упало (до 0) в конце 2009 г., т. е. интервал инверсии высокоширотных магнитных полей в СЦ 24 начался всего через год после достижения минимума солнечных пятен (12.2008). В предыдущих циклах инверсия этих полей начиналась значительно позже, через 3–4 года после минимума активности по пятнам. Данные обсерватории Маунт Вилсон по полярным факелам [6] опубликованы лишь до 2007 г.

Кроме того, необычность в поведении крупномасштабных солнечных магнитных полей видна (на нижней панели рис. 1) в сильном регулярном ослаблении дипольной составляющей на протяжении трёх последних СЦ, а также во внезапном возрастании “монопольной” составляющей в СЦ 23 (1995–2001 гг.). Эти данные — результат, полученный в модели магнитных полей в ближайшем окружающем Солнце пространстве, разработанной в обсерватории Дж. Вилкокса, США [12]. Эта модель опирается на данные регулярного сканирования проекции вдоль луча зрения крупномасштабного магнитного поля на фотосфере Солнца и позволяет рассчитывать магнитное поле в шаровом слое  $r_S \leq r \leq r_{SS}$  (где  $r_S$  и  $r_{SS} = (2.5-3.25)r_S$  — радиусы, соответственно, Солнца и т. н. поверхности источника гелиосферного магнитного поля) в предположении отсутствия тока в этом слое. В основном источник “монопольной” составляющей солнечного магнитного поля — методический, обусловленный предположением, что распределение магнитного поля на фотосфере слабо меняется за оборот Солнца ( $\approx 27$  дней, [2]), т. е. её сильное возрастание на фазе роста пятенной активности в СЦ 23 свидетельствует о необычно сильной динамике крупномасштабных магнитных полей в этот период.

*Сравнение характеристик СЦ 23 с характеристиками предыдущих циклов.* Чтобы судить о нормальности или аномальности СЦ 23, полезно сопоставить динамику его развития с развитием не только двух предыдущих циклов (как на рис. 1), но и более двух десятков предыдущих СЦ, о которых есть количественные данные. Сначала сравним СЦ 23 с предыдущими по уровню активности обеих ветвей. На левых панелях рис. 2 показан уровень солнечной активности в 1600–2010 гг., определённый по данным наблюдений с 1874 г. (площадь пятен) и с 1906 г. (числа полярных факелов) и реконструированный по специальной методике [4] за предыдущие годы. Видно, что по максимальному уровню пятнообразовательной активности последние 400 лет можно разделить на интервалы низкой активности (т. н. великие или глобальные минимумы), разделённые интервалами более высокой активности [8]. Последний период высокой активности Солнца (1950–2010 гг.) называют “современным максимумом”. Аналогич-

ные интервалы повышенной и пониженной активности Солнца удаётся выделить и в дотелескопную эру (до 1609 г.), хотя и с меньшей надёжностью [8]. Отметим, что в полоидальной ветви активности выделенные по тороидальной ветви глобальные максимумы и минимумы отражаются не слишком хорошо. Только в период дальтоновского минимума наблюдается некоторое уменьшение максимального за цикл числа полярных факелов. Что касается СЦ 23, по уровню тороидальной активности (площадь пятен) он явно относится к периоду повышенной активности (современный максимум), но по уровню полоидальной активности (число полярных факелов по данным обс. Маунт Вилсон) он резко отличается от циклов этого периода.

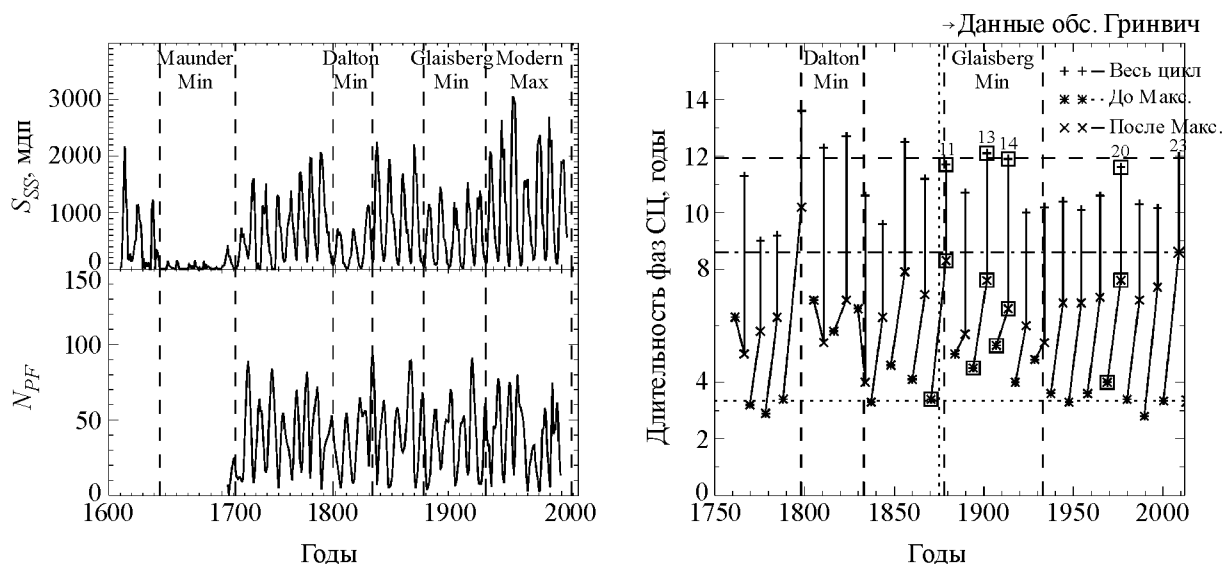


Рис. 2: Солнечная активность и длительность циклов. Вертикальные штриховые линии отмечают границы глобальных минимумов в мощности тороидальной ветви. Левые панели: Площадь солнечных пятен (верхняя панель) и числа полярных факелов (нижняя панель) в 1600 – 2000 гг. [4]. Правая панель: Длительность фаз СЦ 1 – 23 [3]. Отрезками прямых соединены точки, соответствующие длительности фаз роста, спада и всего цикла. Горизонтальными пунктирными прямыми разного типа показаны длительности фаз для СЦ 23. Квадратами отмечены циклы, аналогичные СЦ 23, а вертикальным пунктиром – начала появления более-менее точных данных о солнечных пятнах [11].

Теперь сравним временные характеристики СЦ 23 и предыдущих циклов. На правой панели рис. 2 показаны для тороидальной (или пятнообразовательной) ветви СЦ 1–23

как длительность всего цикла (время от минимума до следующего минимума), так и фаз роста (от минимума до максимума) и спада (от максимума до следующего минимума) [3]. Моменты экстремумов определены, как обычно, по сглаженным с периодом  $\approx 1$  год относительным числам пятен  $R_z$  или суммарной площади солнечных пятен  $S_{ss}$ . Как видно, по своим временным характеристикам СЦ 23 близок к нескольким циклам (СЦ 11, 13, 14), принадлежащим к глайсберговскому глобальному минимуму (1880–1930 гг.), а также к недавнему СЦ 20. Наиболее необычна большая длительность фазы спада СЦ 23. Обращает на себя внимание также необычность формы циклов, принадлежащих к дальтоновскому глобальному минимуму: у этих циклов, в отличие от нормальных, длительность фазы роста примерно равна или даже больше, чем фазы спада.

*Возможные варианты развития текущего СЦ 24.* На рис. 3 показано поведение тороидальной ветви в СЦ 23 и 24, и развитие последнего сравнивается со средними циклами в основных глобальных экстремумах СА последних 400 лет. Видно, что развитие тороидальной ветви СЦ 24 в первые два года после его начала указывает, что этот цикл не будет нормальным, соответствующим эпохе “современного максимума”, но не будет и экстремально низким, как в эпоху маундеровского минимума (1645–1716 гг.), когда привычный нам 11-летний цикл практически отсутствовал. Пока не ясно, будет ли СЦ 24 аналогичен циклам глайсберговского или дальтоновского минимумов. Отмечу только, что если развитие СЦ 24 пойдёт по сценарию среднего цикла в дальтоновском минимуме, максимум в СЦ 24 может наступить в 2014–2016 гг., а если по сценарию глайсберговского минимума – значительно раньше, в 2012–2013 гг.

*О причинах аномального поведения солнечной активности в СЦ 23–24.* По нашему мнению, причины необычного поведения солнечной активности в текущем и предыдущем циклах следует искать на пути моделирования реальной солнечной активности, пользуясь теорией динамо, которая исходит из равнопроявления и взаимодействия тороидальной и полоидальной составляющих магнитного поля и уже позволила воспроизвести основные закономерности солнечной активности (см., напр., [9]).

Например, в работе [1] используется система уравнений

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{r \sin \theta} (\vec{u} \cdot \nabla) (r \sin \theta A) = \eta \left( \nabla^2 - \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \right) A + S(r, \theta, B_\phi), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_\phi}{\partial t} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} r u_r B_\phi + \frac{\partial}{\partial \theta} u_\theta B_\phi \right) = & r \sin \theta (\vec{B}_p \cdot \nabla) \Omega - \nabla \eta \times \nabla \times B_\phi \vec{e}_\phi + \\ & + \eta \left( \nabla^2 - \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \right) B_\phi, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $B_\phi \vec{e}_\phi$ ,  $\vec{B}_p = \nabla \times (A \vec{e}_\phi)$  – соответственно, тороидальное и полоидальное магнитное

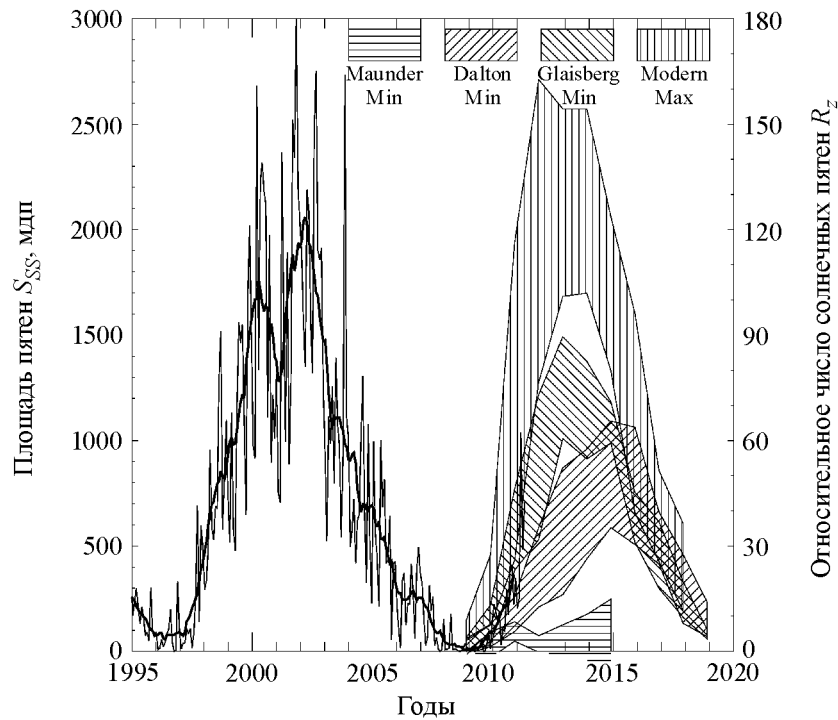


Рис. 3: СЦ 23 – 24 в сравнении со средними СЦ глобальных экстремумов. Средняя за оборот Солнца суммарная площадь солнечных пятен показана тонкой линией, а более жирной – площадь, сглаженная с периодом  $\approx 1$  год. Полосами с различной штриховкой показано развитие циклов, усреднённых за периоды различных глобальных минимумов и “современного максимума”. Границы этих полос по вертикали равны среднему значению площади плюс-минус среднеквадратичное отклонение.

поле, а  $\Omega$ ,  $\vec{u}$ ,  $\eta$ ,  $S(r, \theta, B_\phi)$  — коэффициенты системы (соответственно, угловая скорость вращения, скорость конвекции, коэффициент диффузии и источник полоидального поля), по возможности определённые из наблюдений. Решая численно систему (1)–(2) с определёнными граничными условиями, авторы сравнивают расчётные временные и пространственные характеристики тороидального и полоидального полей с наблюдаемыми (площадь пятен и напряжённость высокоширотных полей) и путём численного эксперимента устанавливают причины тех или иных аномалий, наблюдаемых в первой половине СЦ 23. В работе [5] показано, что быстрая меридиональная конвекция в первой половине цикла и её замедление во второй половине позволяют объяснить основные особенности периода минимума СЦ 23.

*Выводы.* 1. СЦ 23 (1996–2008 гг.) существенно отличается от привычных циклов (17–22) солнечной активности не только по характеристикам тороидальной (пятнообразовательной) ветви, но и по уровню и особенностям полоидальной (высокоширотной) ветви активности Солнца.

2. По временным характеристикам своего развития СЦ 23 напоминает циклы глайсберговского глобального минимума (1880–1930 гг.). По уровню пятнообразовательной активности он ближе к циклам эпох глобальных максимумов, но с аномально низким уровнем полоидальной ветви.

3. Первые два года развития пятнообразовательной активности нового СЦ 24 указывают, что он будет существенно отличен как от последних циклов “современного максимума”, так и от аномально низких циклов эпохи маундеровского минимума. Будет ли он аналогичен циклам несколько пониженной мощности (как в глайсберговском минимуме) или ещё более низким циклам (как в дальтоновском минимуме) покажут ближайшие 1–2 года.

4. Причины аномального поведения активности во второй части СЦ 23 и в начале СЦ 24 наиболее перспективно искать на пути моделирования реальных солнечных характеристик в рамках моделей солнечного динамо.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Dikpati et al., *Geophysical Research Letters* **33**, L05102 (2006).
- [2] J. T. Hoeksema, *PhD Thesis* (Stanford University, USA, 1984), p. 222.
- [3] M. B. Krainev, *Solar and solar-terrestrial physics – 2008* (Pulkovo, St-Petersburg, GAO RAS, 2008), p. 181.
- [4] Ю. А. Наговицын, *Астрофизический бюллетень* **63**(1), 45 (2008).
- [5] D. Nandy et al., *Nature* **471**(7336), 80 (2011).
- [6] N. R. Sheeley, Jr., *Ap. J.* **428**, 1553 (2008).
- [7] N. R. Sheeley, Jr., *ASP Conference Series* **428**, 3 (2010).
- [8] D. J. Schove, *Sunspot cycles* (Hutchinson Ross. Publ., Straudsburg, PA, USA, 1983).
- [9] G. Rüdiger and R. Arlt, in *Advances in Nonlinear Dynamics*, eds. A. Ferriz-Mas and M. Nunez (London, Taylor and Francis, 2003), p. 147.
- [10] <http://www.solarstation.ru>.
- [11] <http://solarscience.msfc.nasa.gov.greenwch.shtml>.
- [12] <http://wso.stanford.edu>.

Поступила в редакцию 17 мая 2011 г.