

УДК 523.98

О загадке продолжительности 23-го цикла солнечной активности

В.Н. Криводубский

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Тараса Шевченко,
Киев-53, 04053
krivod1@observ.univ.kiev.ua

Поступила в редакцию 1 сентября 2010 г.

Аннотация. Для объяснения затянувшейся продолжительности 23-го солнечного цикла на основе модели $\alpha\Omega$ -динамо мы приняли во внимание новейшие телескопические наблюдательные данные о существенном возрастании величины усредненного годичного модуля магнитных полей пятен и подавление α -эффекта, связанное с этим наблюдательным фактом. Рассчитанная нами длительность динамо-цикла с учетом магнитного подавления параметра турбулентной спиральности увеличилась приблизительно на 2 года в сравнении со средним значением периода солнечных циклов (11 лет) и составила ≈ 13 лет.

ON THE MYSTERY OF 23RD SOLAR CYCLE ACTIVITY DURATION, *by V.N. Krivodubskij*. To explain the mystery of the extended 23rd solar cycle duration on the base of $\alpha\Omega$ -dynamo model we took into account the up-to-date telescopic observation data on the essential increase of the averaged annual module of sunspot magnetic fields, and the quenching of the α -effect, associated with the observed fact. The calculated 23rd cycle dynamo-period became approximately 2 years longer (in comparison with the average 11-year solar cycle duration), that is about 13 years.

Ключевые слова: солнечный цикл, конвективная зона, период солнечного динамо-цикла, магнитные поля пятен, магнитное подавление спиральности турбулентных пульсаций

1 Проблема затянувшегося во времени 23-го цикла

Как известно, продолжительность 23-го цикла солнечной активности составила около 13 лет, что заметно превысило средний период циклов около 11 лет (Циммерман, 2009). Солнце преподнесло сюрприз гелиофизикам, которые прогнозировали эпоху минимума 23-го цикла в 2007 году. В действительности же новый 24-й цикл начался только в середине 2009 года (см. <http://www.swpc.noaa.gov/Solar Cycle>, и работу Пишкало (2010)). Поэтому возникает необходимость объяснения аномалии затянувшейся продолжительности периода 23-го цикла.

2 Модель солнечного динамо-цикла

Хорошо известно, что последовательные циклы солнечной активности немного отличаются друг от друга по амплитуде, продолжительности и другим характеристикам. Объяснение этих разли-

чий обычно состоит в том, что основные характеристики цикла зависят от глобальных параметров, управляющих циклом. Случайные кратковременные и даже незначительные флуктуации управляющих параметров могут объяснить наблюдаемые вариации и аномалии солнечных циклов.

Согласно современным представлениям физическая природа цикла активности состоит в распространении квазипериодических волн магнитного поля, возбуждаемых механизмом $\alpha\Omega$ -динамо в нижней части солнечной конвективной зоны (СКЗ). В рамках этого подхода дифференциальное вращение Солнца генерирует тороидальное магнитное поле из полоидального (Ω -эффект). В свою очередь, спиральные конвективные движения, действуя на тороидальное поле, регенерируют новое полоидальное поле, направленное противоположно его исходному направлению (α -эффект) (Вайнштейн и др., 1980). Таким образом происходит замыкание цепи самовозбуждения магнитного поля в солнечном цикле. В результате возникает распространяющаяся в широтном направлении (вдоль меридианов) волна тороидального поля (т. н. динамо-волна). Направление миграции динамо-волны зависит от знака произведения параметров α и $\partial\Omega/\partial r$, управляющих циклом. Тогда как время распространения динамо-волны, играющее роль периода динамо-цикла солнечной активности, определяется выражением:

$$T \approx 2\pi / \left\{ (1/2) |\alpha \partial\Omega/\partial r| \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

где

$$\alpha \approx -\frac{\tau}{3} \langle \mathbf{v} \cdot \text{rot } \mathbf{v} \rangle \approx -\frac{2}{3} \Omega l^2 \left(\frac{\nabla \rho}{\rho} + \frac{\nabla v}{v} \right) \quad - \quad (2)$$

параметр спиральности конвективных (турбулентных) пульсаций в СКЗ; \mathbf{v} – вектор поля турбулентных скоростей; τ , l и v – соответственно характерные время, масштаб и среднеквадратичная скорость $v = \langle v^2 \rangle^{1/2}$ турбулентных пульсаций; ρ – плотность солнечной плазмы, угловые скобки $\langle \rangle$ обозначают операцию усреднения по пространственным или временным промежуткам, значительно превышающим соответствующие масштабы турбулентности, $\partial\Omega/\partial r$ – радиальный градиент угловой скорости.

Необходимо отметить, что возрастание тороидального магнитного поля B , ответственного за появление пятен на солнечной поверхности, в нелинейном режиме приводит к насыщению параметра α . Магнитное насыщение α -эффекта описывается выражением (Рюдигер и Кичатинов, 1993):

$$\alpha(\beta) = \alpha_0 \Psi_\alpha(\beta), \quad (3)$$

где α_0 – “немагнитное” значение параметра спиральности (см. выражение (2)), $\beta = B/B_{eq}$ – параметр нормированного магнитного поля, $B_{eq} \approx v(4\pi\rho)^{1/2}$ – равномерно распределенная магнитная индукция, возбуждаемая мелкомасштабными турбулентными пульсациями со скоростью v , а $\Psi_\alpha(\beta)$ – нормированная на единицу функция магнитного насыщения α -эффекта (т. н. квенчинг-функция). При сильных магнитных полях квенчинг-функция становится пропорциональной β^{-3} (Рюдигер и Кичатинов, 1993):

$$\Psi_\alpha(\beta) = 15\pi/64\beta^3. \quad (4)$$

Ранее нами было показано, что период динамо-волны с учетом магнитного насыщения по порядку величины близок к 11 годам (Криводубский, 2003, 2005). При расчетах значение стационарного тороидального поля ($B \approx 2000 - 2300$ Гс) мы определили из баланса двух конкурирующих эффектов, обуславливающих радиальный перенос крупномасштабного горизонтального поля в СКЗ: магнитной плавучести Паркера и направленного вниз макроскопического диамагнитного вытеснения поля. На основании полученного значения B мы рассчитали величины параметра $\beta \approx 0.9$ и квенчинг-функции $\Psi_\alpha(\beta) \approx 0.3$. При оценках периода динамо-цикла значение параметра $\partial\Omega/\partial r \approx 3.3 \cdot 10^{-18}$ рад/с·см было оценено из гелиосейсмологических измерений (Хове и др., 2000), а в качестве величины параметра насыщенной спиральности $\alpha(\beta) \approx 2 \cdot 10^2$ см/с мы использовали свои собственные расчеты (Криводубский, 2005) для модели СКЗ Стикса (1989).

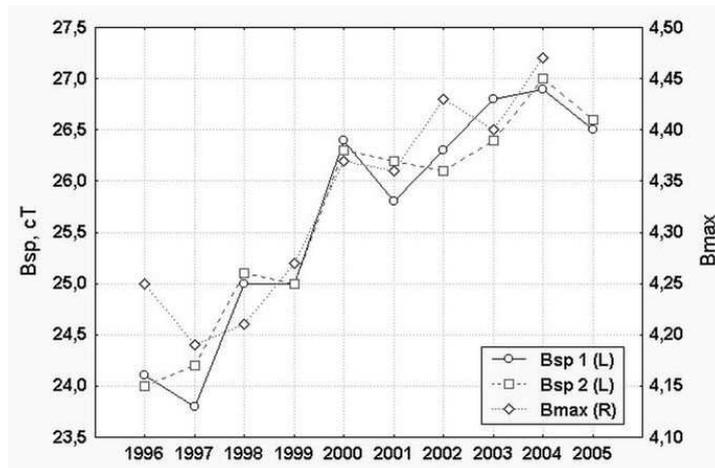


Рис. 1. Рост индукции магнитного поля солнечных пятен больших размеров (диаметром 30–60′′) в 23-м цикле (рисунок взят из работы (Лозицкая и др., 2007) с разрешения ее авторов). Обозначения: B_{sp1} – среднегодичное значение модуля магнитной индукции пятен, полученное как средневзвешенное величины всего массива годичных измерений 4-х обсерваторий; B_{sp2} – то же самое, но значения получены усреднением по обсерваториям без учета количества измерений на каждой из них; B_{max} – индекс среднегодичной максимальной ежедневной магнитной индукции групп солнечных пятен, введенный ранее Ю.И. Витинским (1973). Значения индукции магнитного поля приведены в единицах сантисесла (сТ)

3 Данные наблюдений магнитных полей солнечных пятен

Объяснить отмеченную выше аномалию длительности 23-го цикла можно, на наш взгляд, привлекая последние результаты работы (Лозицкая и др., 2007), касающиеся заметного возрастания величины модуля магнитных полей пятен в течение первой половины 23-го цикла. Авторы работы (Лозицкая и др., 2007) использовали данные телескопических спектральных наблюдений солнечных пятен четырех обсерваторий: Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Крымской астрофизической обсерватории, Астрономической обсерватории Уральского университета и обсерватории Маунт-Вилсон. Ими было обработано больше 2000 визуальных измерений магнитных полей больших по размерам пятен (диаметром 30–60′′) на фазах подъема и максимума 23-го цикла (с 1996 по 2004 гг.). В результате проведенного анализа был установлен факт возрастания значений межгодовых вариаций модуля магнитных полей солнечных пятен, который авторы работы (Лозицкая и др., 2007) назвали индексом B_{sp} . За исследованный период времени рост величины B_{sp} составил около 300 Гс (2700–2400 Гс) (рис. 1), или в относительном измерении $\approx 13\%$. Одновременно авторы статьи определили и индекс Витинского средних максимальных магнитных индукций групп солнечных пятен B_{max} (Витинский, 1973). В расчетах указанного индекса были использованы данные измерений обсерватории Маунт-Вилсон.

Полученные результаты (Лозицкая и др., 2007) ставят под сомнение утверждения других исследователей (Ливингстон, 2002; Атач и Узгуч, 2006; Ливингстон и Пенн, 2009) о том, что 23-й цикл солнечной активности был магнитно-слабым.

4 Анализ данных наблюдений на основе динамо-модели

Для объяснения аномальной продолжительности 23-го цикла на основе динамо-модели проведем некоторые оценки с привлечением обработанных данных телескопических наблюдений, которые характеризуют временное поведение полей пятен на фазе роста 23-го цикла (Лозицкая и др., 2007).

В соответствии с этими данными модуль магнитных полей пятен B_{sp} в максимуме 23-го цикла возрос приблизительно на 13 % (по сравнению с его значением в эпоху минимума этого цикла). А это значит, что и параметр $\beta_{sp} \approx B_{sp}/B_{eq}$ также увеличился примерно в 1.13 раза за это время. Следовательно, квенчинг-функция должна *уменьшиться* в 1.44 раза, поскольку, как отмечалось, в случае сильных полей ее величина пропорциональна B_{sp}^{-3} . Поэтому в максимуме 23-го цикла ее величина составила около 70 % ее значения в минимуме цикла: $\Psi_{\alpha}^{23max}(\beta_{sp}) \approx 0.7\Psi_{\alpha}^{23min}(\beta_{sp})$, что привело, в свою очередь, к уменьшению и параметра спиральности $\alpha^{23max}(\beta_{sp}) = \alpha_0\Psi_{\alpha}^{23max}(\beta_{sp})$. Из этих оценок следует, что длительность динамо-цикла, которая обратно пропорциональна величине параметра спиральности ($T \sim \alpha^{-1/2}$), должна увеличиться в $[0.7]^{-1/2} \approx 1.2$ раза. Если исходить из среднего значения периода солнечных циклов $T \approx 11$ лет, то для 23-го цикла получаем продолжительность динамо-периода около 13 лет (Криводубский, 2010).

5 Вывод

Таким образом, кратковременное возрастание модуля индукции магнитных полей пятен (на 300 Гс (13 %)) в первой половине 23-го цикла привело к уменьшению величины параметра α -эффекта, управляющего периодом цикла в рамках модели $\alpha\Omega$ -динамо. В результате рассчитанная длительность динамо-цикла с учетом магнитного альфа-квенчинга увеличилась приблизительно на 2 года в сравнении со средним значением периода солнечных циклов (11 лет) и составила ≈ 13 лет.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Ф25.2/094 Государственного фонда фундаментальных исследований Министерства образования и науки Украины.

Литература

- Атач, Узгуч (Атаç Т., Özgüç А.) // Solar Phys. 2006. V. 233. P. 139.
 Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А. // Турбулентное динамо в астрофизике. М. 1980.
 Витинский Ю.И. // Цикличность и прогнозы солнечной активности. Ленинград. 1973.
 Криводубский (Криводубський В.Н.) // Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Астрономія. 2003. №. 39–40. С. 10.
 Криводубский (Krivodubskij V.N.) // Astron. Nachr. 2005. V. 326. №. 1. P. 61.
 Криводубский (Krivodubskij V.) // IAU Symp. 273 “Physics of Sun and Star Spots”. Ventura. California. USA. 23–26 August. 2010. Poster Abstracts – 0046. P. 44.
 Ливингстон (Livingston W.) // Solar Phys. 2002. V. 207. P. 41.
 Ливингстон, Пенн (Livingston W., Penn M.) // EOS, Transactions American Geophysical Union. 2009. V. 90. №. 30. P. 257.
 Лозицкая Н.И., Лямова Г.В., Малащук В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2007. Т. 103. №. 4. С. 59.
 Пешкало (Pishkalo M.I.) // Sun and Geosphere. 2010. V. 5. №. 2.
 Рюдигер, Кичатинов (Rüdiger G., Kitchatinov L.L.) // Astron. Astrophys. 1993. V. 269. P. 581.
 Стикс (Stix M.) // The Sun. Berlin-Heidelberg-New York. 1989.
 Хове и др. (Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al.) // Science. 2000. V. 287. P. 2456.
 Циммерман Р. (Zimmerman R.) // Sky and Telescope. 2009. August. V. 118. №. 2. P. 26.