

УДК 523.98

Загадки аномального 23-го цикла солнечной активности: наблюдения и интерпретация (обзор)

В.Н. Криводубский

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

Поступила в редакцию 30 сентября 2011 г.

Аннотация. Приведены основные наблюдаемые индексы солнечной активности аномального 23-го цикла. Для некоторых аномалий приведены интерпретации.

MYSTERIES OF THE ANOMALOUS SOLAR CYCLE 23: OBSERVATIONS AND INTERPRETATION (REVIEW), by *V.N. Krivodubskij*. The main observed solar activity indices of the anomalous solar cycle 23 are submitted. The interpretation of some anomalies is reported.

Ключевые слова: солнечный магнитный цикл, индексы солнечной активности, прогнозы солнечных циклов

1 Основные аномалии 23-го цикла

- Продолжительность 23-го цикла составила около 13 лет (Циммерман, 2009; см. также обзор Обридко, 2009 и сайт <http://www.swpc.noaa.gov/Solar Cycle>), что заметно превысило среднестатистический период солнечных циклов ≈ 11 лет.
- Величина активности характеризовалась непредвиденно аномально низкими значениями относительных чисел солнечных пятен (чисел Вольфа) и площади пятен. В максимуме цикла сглаженное месячное число Вольфа W составило около 120 единиц, хотя по прогнозам оно должно было достичь больших значений (<http://www.swpc.noaa.gov/Solar Cycle>). При этом особенно низким уровень активности был во время затяжного минимума цикла, что привело к самому глубокому минимуму за последние 100 лет (Гибсон и др., 2009).
- Большой неожиданностью стало то, что вопреки правилу Гневышева-Оля, ведомый нечетный цикл по величине числа Вольфа стал меньше ведущего четного 22-го цикла. Объяснение кажущейся загадки предложили Наговицын и др. (2009) в рамках *второй формулировки* правила Гневышева-Оля для пары циклов 22–23. А именно: площадь под кривой чисел Вольфа четного 22-го цикла ($2n$) коррелирует с аналогичной характеристикой последующего нечетного 23-го цикла ($2n+1$). Другими словами, затянувшаяся продолжительность 23-го цикла компенсируется его довольно низким максимумом по числам Вольфа.
- В течение цикла на солнечном диске впервые после 1913 года фиксировалось необычно большое число дней (> 800) без пятен (Ливингстон и Пенн, 2009; Нанди и др., 2010), чем собственно и обусловлено наблюдаемое низкое число Вольфа в 23-м цикле. Вместе с

Загадки аномального 23-го цикла...

уменьшением величины полярного магнитного поля в конце цикла (см. ниже) это, очевидно, свидетельствует о начале затяжного 80-летнего периода минимума солнечной активности, хотя это может быть и временным статистическим эффектом падения уровня активности (Мартенс и др., 2009).

- Величина магнитного поля на полюсах Солнца в конце цикла была заметно меньшей (приблизительно на 40–50 %), чем в эпоху минимумов предыдущих трех циклов (Ванг и др., 2009; Дикпати, 2011; Нанди и др., 2010, 2011). Ослабление полярного поля сопровождалось уменьшением межпланетного магнитного поля, сокращением площади полярных корональных дыр, понижением потока частиц солнечного ветра над полюсами (Ванг и др., 2009). Оно также нашло отражение в изменениях структуры корональных стримеров и гелиосферного токового слоя, а также микроволновой яркостной температуры корональных дыр (Гопалсвами и др., 2009) и эмиссии корональных линий (Роббрехт и др., 2010). Ослабление полярных полей может быть вызвано эффектом возмущений направленных к полюсам меридиональных потоков. Оказалось, что в меридиональных течениях существуют локальные структуры с повышенной скоростью, которые по мере нарастания активности смещаются к экватору, и тем самым ослабляют перенос магнитных полей к полюсам (Джянг и др., 2010) (детальнее см. ниже).
- Согласно Ливингстону (2002) и Ливингстону и Пенну (2009) начиная с 1992 г. наблюдалось постепенное временное падение напряженности магнитных полей пятен. На основании этого они спрогнозировали, что магнитные поля в 2022 г. достигнут «критически» малой величины 1500 Гс и пятна могут вообще исчезнуть. Однако этот вывод нельзя считать убедительным, поскольку их ряд наблюдений слишком короткий и неоднородный (наряду с крупными пятнами принималось во внимание очень много мелких пор).
- Ливингстон и Пенн (2009) определили текущий цикл как магнитно-слабый. Причина такого вывода, на наш взгляд, может быть связанной с тем, что при анализе наблюдаемых данных эти исследователи, по-видимому, не разделяли крупномасштабные поля пятен и их маломасштабные слабые «магнитные сателлиты» – поры. А это имеет принципиальное значение при определении «магнитной мощности» цикла и при расчетах чисел Вольфа. Действительно, если опираться только на числа Вольфа, при расчете которых учитываются маленькие пятна и поры (количество которых уменьшилось), то 23-й цикл, бесспорно, является слабым по сравнению с предыдущими двумя циклами, что и отмечается исследователями (Ишков, 2009; Обридо, 2009; Пишкало, 2010а, б; и др.).
- Вместе с тем, если принимать во внимание только пятна больших размеров, порожденные всплывающими сильными подфотосферными магнитными полями, то магнитная обстановка на Солнце выглядела несколько иначе. Согласно исследованиям Лозицкой и др. (2007), базирующимся на > 2000 измерениях магнитных полей крупных пятен (диаметром 30–60"), величина модуля магнитных полей на фазах подъема и максимума цикла заметно возросла (примерно на 13 %) по сравнению с ее значением в начале цикла (было проанализировано больше 2000 визуальных наблюдений). В связи с этим первую половину 23-го цикла «в магнитном смысле» можно отнести к мощной стадии цикла. Поэтому, на наш взгляд, более адекватной может быть такая характеристика: первая половина 23-го цикла была магнитно-сильной, тогда как конечную стадию активности цикла после 2005 г. действительно можно считать магнитно-слабой.
- Если определять уровень солнечной активности, как обычно принято, по числу всех пятен и всех вспышек (Белов, 2009; Жарков и Жаркова, 2011), то 23-й цикл, как уже отмечалось, попадает в число слабых. Однако в течение цикла количество мощных нестационарных процессов было, наоборот, велико (см. обзор Обридо, 2009). Число рентгеновских вспышек, протонных событий вблизи Земли, количество аномальных Форбуш-эффектов (т. е. понижений рассеяния галактических космических лучей гелиосферным токовым слоем на магнитных

неоднородностях в гелиосфере, обусловленных увеличением количества корональных выбросов солнечного вещества от вспышек, выбросов волокон и корональных дыр) в 23-м цикле возросло (Белов, 2009; Ишков, 2009). При этом наблюдались пространственно-временные флуктуации почти всех параметров, описывающих активность Солнца (см. ниже).

- В максимуме цикла произошло заметное уменьшение солнечной постоянной (общей солнечной иррадиации) (Мартенс и др., 2009; Нанди и др., 2010), что, очевидно, связано с необычным дефицитом количества полярных факелов. Величина потока солнечного радиоизлучения также была необычно пониженной (Нанди и др., 2010).
- В конце цикла угол раствора (“tilt”) гелиосферного токового слоя (ГТС) приближался к нулю (уплощение слоя) гораздо медленнее, чем в предыдущих циклах (Белов, 2009; <http://wso.stanford.edu/>). Это может отражать ослабление полярного магнитного поля (Ванг и др., 2009) и магнитного момента дипольной компоненты глобального поля (Обридко и Шельтинг, 2009), а также повышение значения полей средних размеров (Обридко, 2009). Последнее подтверждается большим количеством приэкваториальных высокоскоростных потоков солнечного ветра по сравнению с предыдущими минимумами (Гибсон и др., 2009).
- Радиальная компонента гелиосферного магнитного поля и связанный с ней т. н. открытый магнитный поток Солнца были более низкими по сравнению с предыдущим минимумом. При этом скорость солнечного ветра в плоскости эклиптики вблизи Земли в 2003 г. и в минимуме была выше, чем в предыдущих циклах (Гибсон и др., 2009). Вместе с тем наблюдения Солнца и солнечного ветра над полюсами (с помощью космического аппарата Ulysses) показывают, что магнитное поле в солнечном ветре существенно уменьшилось, так же как плотность и скорость солнечного ветра (Гибсон и др., 2009). Оказалось, что энергия и плотность частиц солнечного ветра (а также магнитное поле в солнечном ветре) были необычно низкими с момента их измерений в течение последних 40 лет (Фиск и Жао, 2009). Циклические изменения солнечного ветра проанализированы также в работах Лотовой и др. (2009) и Никольской (2009), а скорости корональных выбросов массы – в работе Иванова (2009).
- Понижение плотности и магнитного поля в солнечном ветре вызвали экранировку Земли от галактических космических лучей (ГКЛ): чем больше напряженность магнитного поля на поверхности источника и чем сильнее наклонен ГТС, тем глубже модуляция ГКЛ. Поэтому в минимуме цикла, когда магнитное поле было пониженным, зарегистрирован самый высокий поток ГКЛ (<http://wso.stanford.edu/>; Обридко, 2009; Белов, 2009).
- В течение цикла наблюдалось уменьшение наклона углов ориентации оси биполярных групп пятен по отношению к экватору (отклонение от закона Джоя) (Мартенс и др., 2009).
- На фазе падения активности цикла произошло замедление скорости миграции поверхностных зональных торсионных колебаний от средних широт к экватору по сравнению с предыдущим минимумом (Хау и др., 2009а). Это привело к временной задержке на 1.5–2 года смещения к экватору полос быстрого вращения солнечной поверхности (Хау и др., 2009b, 2011а; Хилл и др., 2011). Вблизи 2005 г. полосы участков ускоренного азимутального вращения в солнечной конвективной зоне в приэкваториальном домене “раздваивались”, тогда как после 2008 г. они снова “объединялись” (Антиа и Басу, 2010). Найдены также существенные различия в природе зональных потоков между минимумами 23 и 24 циклов (Антиа и Басу, 2011).
- После максимума цикла произошла смена режима торсионных колебаний в тахоклине возле дна солнечной конвективной зоны: период колебаний 1.3 года, обнаруженный в гелиосейсмических экспериментах в начале цикла, после 2000-2001 гг. исчез и больше в гелиосейсмических измерениях не выявлялся (Хау и др., 2007, 2011b).
- На фазе падения активности цикла произошло заметное уменьшение скорости направленных от экватора к полюсам меридиональных потоков (меридиональной циркуляции) по сравнению с их величиной на фазе роста цикла (Нанди и др., 2011). Вместе с тем меридиональные

Загадки аномального 23-го цикла...

потоки в течение минимума цикла 23/24 были немного сильнее, чем в течение предыдущего минимума 22/23 (Комм и др., 2011). Важно также, что возмущения структуры меридиональных потоков разнесены по широте на большие расстояния, чем возмущения в структуре торсионных колебаний зональных потоков (Комм и др., 2011).

- При этом было найдено, что меридиональные потоки сосредоточены близко к солнечной поверхности, тогда как мигрирующие к экватору зональные структуры торсионных колебаний локализованы в более глубоких слоях (Нанди и др., 2011). Хэтэуэй и Райтмайе (2011) на основании наблюдений маленьких магнитных поверхностных элементов с помощью аппарата SOHO/MDI обнаружили, что их меридиональная скорость уменьшилась возле солнечного максимума и уже не восстановилась на фазе спада цикла.
- В течение цикла в направленных к полюсам меридиональных потоках (2 % внешних слоев Солнца) выявлены структуры с повышенной скоростью, которые по мере нарастания активности смещаются к экватору (Басу и Антия, 2010). При этом мигрирующие возмущения меридиональных потоков совпадают с «диаграммой бабочек» солнечных пятен и зональными потоками в поверхностных слоях (Басу и Антия, 2011). В конце цикла мигрирующие к экватору возмущения меридиональных потоков определялись раньше появления на солнечной поверхности магнитных областей. Это обстоятельство породило дискуссию о том, являются ли эти возмущения эффектом движений вещества вокруг активных областей в конце затяжного минимума цикла, и можно ли их использовать для заблаговременного предсказания появления на поверхности магнитных полей в поясах активности (Гонсалес и др., 2010).

2 Объяснение затянувшейся во времени продолжительности 23-го цикла

- В рамках механизма $\alpha\Omega$ -динамо предложено объяснение основной аномалии: затяжной продолжительности 23-го цикла. Мы приняли во внимание существенное возрастание годичного модуля магнитных полей солнечных пятен на фазе роста 23-го цикла (Лозицкая и др., 2007), которое отображает рост величины индукции всплывающего на поверхность тороидального поля и рассчитали магнитное подавление параметра α возросшим тороидальным полем (нелинейный режим динамо). Поскольку величина периода динамо-цикла обратно пропорциональна корню квадратному из величины α параметра $T \sim \alpha^{-1/2}$ (Вайнштейн и др., 1980; Криводубский, 2005), то рассчитанный нами динамо-период 23-го цикла увеличился в 1.2 раза по сравнению с усредненной длительностью циклов около 11 лет и составил ≈ 13 лет (Криводубский, 2010; Криводубский и Черемных, 2011).

3 Прогнозы 24-го цикла и попытки предвидения начала минимума вековых циклов

- Китяшвили и Косовичев (2008) для предсказания свойств солнечных циклов использовали метод уподобления данных (a data assimilation method) Ensemble Kalman Filter, который, принимая во внимание неопределенности динамо-моделей и измерений, позволяет оценить будущие наблюдаемые данные. В рамках модели $\alpha\Omega$ -динамо с переменной магнитной спиральностью этот метод предсказывает, что наступающий 24-й цикл по числам Вольфа будет существенно слабее (приблизительно на 30 %) предыдущих циклов, подтверждая наметившуюся тенденцию к долговременному понижению солнечной активности.
- Используя солнечную динамо-модель Чоудхури и др. (2007) сделали предсказание, что 24-й цикл будет на 35 % слабее 23-го цикла.

- Согласно Ишкову (2009) развитие текущего 24-го цикла соответствует ходу эволюции более ранних солнечных циклов, для которых число Вольфа находится в диапазоне от 80 до 130 единиц.
- Актуальность характеристик солнечной активности в период Маундеровского минимума и их значение для теории динамо и предсказаний активности освещены в работе Соколова и др. (2009).
- Согласно методу Наговицына (2009) (method of multi-scale cloning) солнечная активность после высоких циклов 20-го века возвращается к характерному среднему уровню и в конце 21-го века следует ожидать глобального минимума активности.
- Мордвинов и Крамынин (2009) на основании реконструкции значений чисел Вольфа на протяжении последних 11 тысяч лет предсказывают понижение активности в предстоящих циклах активности.
- На основании концепции одного управляющего параметра и момента появления первого пятна нового цикла Волобуев (2009) прогнозирует, что амплитуда 24-го цикла должна составить около 120 чисел Вольфа.
- В результате анализа временных корреляционных связей между разными параметрами солнечных циклов 1-23, а также на основании данных о полярном магнитном поле Солнца и форме солнечной короны в минимуме 23-го цикла Пишкало (2010а, б) рассчитал основные характеристики нового 24-го цикла. Максимум нового цикла ожидается в конце 2013 – начале 2014 гг., число Вольфа (в единицах сглаженного месячного относительного числа пятен) в это время достигнет значений 88 ± 17 единиц, а продолжительность цикла будет близкой к среднестатистической – 11.3 ± 1.1 лет.
- Криводубский и Черемных (2011) на основе данных наблюдений магнитных полей в конце 23-го цикла (Лозицкая др., 2007) считают, что в рамках модели $\alpha\Omega$ -динамо наступающий 24-й цикл, очевидно, будет относительно слабым в «магнитном смысле», а его продолжительность должна быть близкой к среднестатистической длительности циклов.

Обзор не претендует на полноту и отображает изложение проблемы исходя из доступной автору информации на момент написания статьи.

Литература

- Антиа и Басу (Antia H.M., Basu S.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 720. P. 494.
- Антиа и Басу (Antia H.M., Basu S.) // *Journal of Physics: Conference Series.* 2011. V. 271. Issue 1. P. 012072.
- Басу и Антиа (Basu S., Antia H.M.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 717. P. 488.
- Басу и Антиа (Basu S., Antia H.M.) // *Journal of Physics: Conference Series.* 2011. V. 271. Issue 1. P. 012071.
- Белов А.В. // *Циклы активности на Солнце и звездах.* М.: 2009. С. 63.
- Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А. // *Турбулентное динамо в астрофизике.* М.: Наука. 1980.
- Ванг и др. (Wang Y.-M., Robbrecht E., Sheeley N.R.) // *Astrophys. J.* 2009. V. 707. P. 1372.
- Волобуев Д.М. // *Циклы активности на Солнце и звездах.* М.: 2009. С. 79.
- Гибсон и др. (Gibson S.E., Kozyra J.U., de Toma G., Emery B.A., Onsager T., Thompson B.J.) // *Journal of Geophysical Research.* 2009. V. 114. Issue A9. A09105.
- Гонсалес и др. (González H.I., Howe R., Komm R., Hill F., Schou J., Thompson M.J.) // *Astrophys. J. Lett.* 2010. V. 713. P. L16–L20.
- Гопалсвами и др. (Gopalswamy N., Yashiro S., Makela P.A., Shibasaki K.) // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2009. Abstract #SH13C–02.*

Загадки аномального 23-го цикла...

- Джянг и др. (Jiang J., Isik E., Cameron R.H., Schmitt D., Schussler M.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 717. P. 597.
- Дикпати (Dikpati M.) // *Astrophys. J.* 2011. V. 733. P. 90.
- Жарков и Жаркова (Zharkov S.I., Zharkova V.V.) // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2011. V. 13. Issue 2–3. P. 264.
- Иванов Е.В. // Циклы активности на Солнце и звездах. М.: 2009. С. 73.
- Ишков В.Н. // Циклы активности на Солнце и звездах. М.: 2009. С. 57.
- Китяшвили и Косовичев (Kitiashvili I., Kosovichev A.G.) // *Astrophys. J. Lett.* 2008. V. 688. P. L49–L52.
- Комм и др. (Komm R., Howe R., Hill F., González Hernandez I., Haber D.) // *Journal of Physics: Conference Series.* 2011. V. 271. Issue 1. P. 012077.
- 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.
- Криводубский В.Н., Черемных О.К. // *Космічна наука і технологія.* 2011. Т. 17. № 1. С. 23.
- Ливингстон (Livingston W.) // *Solar Phys.* 2002. V. 207. P. 41.
- Ливингстон и Пенн (Livingston W., Penn M.) // *EOS, Trans. Amer. Geophys. 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.
- Лотова и др. (Lotova N.A., Vladimirkij K.V., Obridko V.N.) // Циклы активности на Солнце и звездах. М.: 2009. С. 143.
- Мартенс и др. (Martens P.C., Nandy D., Muñoz-Jaramillo A.) // *Am. Astron. Soc. SPD Meeting* 40. 2009. № 24.03.
- Мордвинов и Крамынин (Mordvinov A.V., Kramynin A.P.) // Циклы активности на Солнце и звездах. М.: 2009. С. 85.
- Наговицын Ю.А., Наговицына Е.Ю., Макарова В.В. // Циклы активности на Солнце и звездах. М.: 2009. С. 93.
- Наговицын (Nagovitsyn Yu.A.) // Циклы активности на Солнце и звездах. М.: 2009. С. 99.
- Нанди и др. (Nandy D., Muñoz-Jaramillo A., Martens P.C.H.) // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2010. V. 41. P. 898.
- Нанди и др. (Nandy D., Muñoz-Jaramillo A., Martens P.C.H.) // *Nature.* 2011. V. 471. № 7336. P. 80.
- Никольская К.И. // Циклы активности на Солнце и звездах. М.: 2009. С. 107.
- Обридко В.Н. // Циклы активности на Солнце и звездах. М.: 2009. С. 9.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. // *Письма в Астрон. журн.* 2009. Т. 35. № 3. С. 38.
- Пишкало (Pishkalo M.I.) // *Sun and Geosphere.* 2010a. V. 5. № 2. P. 7.
- Пишкало Н.И. // *Космічна наука і технологія.* 2010б. Т. 16. № 3. С. 32.
- Роббрехт и др. (Robbrecht E., Wang Y.-M., Sheeley N.R., Rich N.B.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 716. P. 693.
- Соколов Д.Д., Арльт Р., Мосс Д., Уоскин И., Саар С.Х. // Циклы активности на Солнце и звездах. М.: 2009. С. 167.
- Фиск и Жао (Fisk L.A., Zhao L.) // *Universal Heliophysical Processes, IAU Symp. Proceed.* 2009. V. 257. P. 109.
- Хау и др. (Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., Komm R., Schou J., Thompson M.J., Toomre J.) // *Advances in Space Research.* 2007. V. 40. Issue 7. P. 915.
- Хау и др. (Howe R., Hill F., Komm R., Christensen-Dalsgaard J., Schou J., Thompson M.J., Ulrich R.) // *American Geophysical Union. Fall meeting.* 2009a. Abstract #U34A-03.
- Хау и др. (Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., Komm R., Schou J., Thompson M.J.) // *Astrophys. J. Lett.* 2009b. V. 702. P. L87–L89.

- Хау и др. (Howe R., Hill F., Komm R., Christensen-Dalsgaard J., Larson T.P., Schou J., Thompson M.J., Ulrich R.) // Journal of Physics: Conference Series. 2011a. V. 271, Issue 1. P. 012074.
- Хау и др. (Howe R., Komm R., Hill F., Christensen-Dalsgaard J., Larson T.P., Schou J., Thompson M.J., Toomre J.) // Journal of Physics: Conference Series. 2011b. V. 271. Issue 1. P. 012075.
- Хилл и др. (Hill F., Howe R., Komm R., Christensen-Dalsgaard J., Larson T.P., Schou J., Thompson M.J.) // Am. Astron. Soc. SPD Meeting 42. 2011. #16.10.
- Хэтгэуэй и Райтмайе (Hathaway D.H., Rightmire L.) // Science. 2010. V. 327. Issue 5991. P. 1350.
- Чоудхури и др. (Choudhuri A.R., Chatterjee P., Jiang L.) // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. Issue 13. P. 131103.
- Циммерман Р. (Zimmerman R.) // Sky and Telescope. 2009. August. V. 118. № 2. P. 26.