# АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

# Циклическая активность Солнца по наблюдениям индексов активности на разных временных шкалах

Е. А. Бруевич<sup>*a*</sup>, Г. В. Якунина<sup>*b*</sup>

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ). Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13. E-mail: <sup>a</sup> red-field@yandex.ru, <sup>b</sup> yakunina@sai.msu.ru

Статья поступила 03.04.2015, подписана в печать 29.04.2015.

С помощью частотно-временного анализа рядов наблюдений одного из глобальных индексов солнечной активности — потока радиоизлучения  $F_{10.7}$  на волне 10.7 см (2.8 ГГц) — было определено наиболее вероятное значение периода основного цикла. Эта величина оказалась равной 10.2 года, что согласуется с общепринятыми оценками. Одновременно с основным циклом активности выявлены несколько малоамплитудных циклов с периодами цикличности от 1.3 до 100 лет. Метод непрерывного вейвлет-преобразования с использованием материнского вейвлета Морли был также применен нами для анализа ряда других солнечных индексов, связанных с излучением на разных высотах солнечной атмосферы: относительного числа солнечных пятен — SSN, хромосферного индекса — Mg II 280 нм, потоков в корональной линии 530.3 нм —  $F_{530}$ , вспышечного индекса — Flare index и индекса полного числа вспышек — Counts of flares. Полученные частотно-временные характеристики оказались в целом весьма похожими друг на друга. Различия в результатах для солнечных индексов появляются в периоды усиления стохастических процессов во время максимумов и минимумов основного цикла.

*Ключевые слова*: активность Солнца, индексы активности, циклы солнечной активности. УДК: 523.98: 523.982. РАСS: 96.60.

#### Введение

Солнечная активность представляет собой сложный комплекс явлений и процессов, связанных с эволюцией магнитных полей в солнечной атмосфере. Изучение солнечной активности имеет большое фундаментальное и практическое значение для прогнозирования космического климата, а также процессов в земной атмосфере. Активность Солнца с 1749 г. оценивалась по индексу относительного числа солнечных пятен или чисел Вольфа (SSN).

Переменность солнечного радиоизлучения была обнаружена в наземных обсерваториях в ХХ в. Регулярные радионаблюдения переменности излучения хромосферы и нижней короны с 1947 г. положили начало исследованиям нового глобального индекса — потока радиоизлучения на волне 10.7 см (2.8 ГГц) — F<sub>10.7</sub>. Этот индекс непосредственно связан с излучением от всего диска и в настоящее время чаще других используется при мониторинге и прогнозе солнечной активности. Переменность солнечного радиоизлучения также характеризуется цикличностью, и длительность радиоциклов такая же, как и длительность основного 11-летнего цикла пятнообразовательной деятельности Солнца (цикл Швабе-Вольфа). Важнейшей характеристикой солнечного пятна является его магнитное поле. Изменение числа пятен означает, что происходит изменение в комплексе локальных магнитных полей на Солнце. Полный солнечный цикл связан с эволюцией как локальных полей, так и глобального магнитного поля Солнца и равен двум 11-летним (цикл Хейла).

В настоящее время циклическая переменность излучения Солнца рассматривается как следствие циклических изменений магнитного поля Солнца. В ходе цикла Швабе-Вольфа происходит сложная эволюция магнитных полей: пересоединение магнитных линий и преобразование магнитной энергии в кинетическую и тепловую энергию потоков плазмы. В сумме магнитогидродинамические процессы приводят к образованию активных областей в атмосфере Солнца: факелов и пятен в фотосфере, флоккул в хромосфере и протуберанцев в короне. Эта задача имеет фундаментальное значение не только для астрофизики Солнца, но и звезд. Ее прикладное значение связано с влиянием солнечных активных процессов на магнитное поле Земли. Пока наше понимание физики активных областей недостаточно полное, мы не можем предсказать детали эволюции каждой активной области. Однако коллективную динамику активных областей мы можем диагностировать, изучая циклическую переменность излучения Солнца, которая является следствием выделения энергии в активных областях. Фактически эта переменность позволяет анализировать физические процессы, протекающие не только в атмосфере Солнца, но и в подфотосферных слоях [1]. Кроме того, на основе данных о циклической переменности можно прогнозировать амплитуду цикла магнитной активности Солнца, что очень важно для изучения процессов, протекающих в атмосфере Земли.

В настоящее время налажен непрерывный мониторинг нескольких глобальных индексов солнечной активности с целью отслеживания ситуации на Солнце и построения различных прогнозов. Изучение этих индексов и их взаимная корреляция выполнены нами для 21, 22 и 23-го солнечных циклов [2]. Высокая степень корреляции потока на волне 10.7 см со всеми основными индексами активности предполагает сильную зависимость индексов от параметров плазмы, где эти потоки формируются, при том что области их формирования пространственно близки. Можно отметить также тесную связь между F<sub>10.7</sub> и потоками рентгеновского излучения от всего солнечного диска. Когда активность высока, эти потоки хорошо коррелируют между собой, но при низкой активности, когда поток рентгеновского излучения слишком мал, чтобы быть обнаруженным, корреляция становится слабой [3]. Наш анализ в [2] корреляционных связей между F<sub>10.7</sub> и потоками рентгеновского излучения для разных уровней солнечной активности подтверждают выводы [3].

Мониторинг  $F_{10,7}$  также является полезным инструментом для прогноза вариаций солнечного коронального EUV-излучения (extreme ultra violet), на порядок изменяющегося в зависимости от количества и яркости солнечных активных областей. Именно потоки в EUV-области играют определяющую роль в нагреве термосферы Земли и соответственно в формировании земного климата. Поскольку полный поток F<sub>10.7</sub> достаточно хорошо коррелирует с интегрированными потоками в UV и EUV-областях солнечного спектра, он может использоваться в качестве базового индекса для прогноза потоков и в этих интервалах солнечного спектра [4, 5]. Поток радиоизлучения на волне 10.7 см от всего солнечного диска может быть разделен (на основе характерных временных масштабов) на три компоненты: 1) события, связанные со вспышечной активностью, продолжительностью менее одного часа; 2) медленные вариации интенсивности длительностью от нескольких часов до нескольких лет, связанные с эволюцией активных областей (в циклической активности Солнца обозначаются как S-компонента); 3) минимальный уровень потока  $F_{10,7}$ , ниже которого интенсивность никогда не падает, — «уровень спокойного Солнца» [6]. Согласно наблюдениям, существует тесная корреляция между S-компонентой радиоизлучения на 10.7 см с потоками в линиях Са II и Mg II. Поток на волне 10.7 см увеличивается при увеличении температуры, плотности вещества и магнитных полей, что делает его хорошим индикатором общего уровня солнечной активности. В настоящей работе использовались архивы данных наблюдений индексов солнечной активности NASA [7].

Целью настоящей работы является изучение эволюции солнечной цикличности с 1950 по 2014 г. согласно наблюдениям глобальных индексов активности, формирование которых происходит на различных уровнях в солнечной атмосфере. Анализ временных рядов наблюдений выполнен нами с помощью вейвлет-анализа при использовании наиболее подходящего для астрономических данных вейвлета Морли. Наряду с максимальным по амплитуде основным циклом активности исследуются цикличности значительно меньшие по амплитуде.

# 1. Частотно-временной анализ рядов наблюдений индексов солнечной активности

Вейвлетное преобразование сигналов является развитием методов спектрального анализа, типичный представитель которого — классическое преобразование Фурье. Термин «вейвлет» (wavelet) в переводе с английского означает «маленькая (короткая) волна». Вейвлеты — это обобщенное название семейств математических функций определенной формы, которые локальны по времени и по частоте и в которых все функции получаются из одной базовой (материнской) посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени.

В отличие от спектрального анализа вейвлет-преобразование дает двухмерную развертку анализируемого сигнала, при этом временная координата и частота являются независимыми переменными. Такое представление позволяет исследовать свойства сигнала одновременно во временном и частотном пространствах. Вейвлет-анализ является отличным инструментом для исследования сигналов с изменяющимися во времени частотными характеристиками. Не следует считать, что вейвлет-анализ является заменой классическому спектральному анализу. Они дополняют друг друга и могут эффективно использоваться совместно. Преобразование Фурье дает полную информацию о спектральных характеристиках сигнала в исследуемой частотной области, а с помощью вейвлет-анализа можно исследовать изменения этих характеристик во времени.

Выбор материнского вейвлета для анализа сигнала или изображения диктуется поставленной задачей и характером изучаемого сигнала. Основная область применения вейвлетных преобразований анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результаты анализа должны содержать не только частотную характеристику сигнала (распределение энергии сигнала по частотным составляющим), но и сведения о локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала. В работах [8, 9] показано, что современные методы спектрального анализа, в частности вейвлет-анализ, позволяют успешно осуществлять обработку данных наблюдений солнечной активности на разных временных масштабах. Таким образом, вейвлет-анализ имеет преимущество перед преобразованием Фурье, которое дает только сведения о наборе периодов, но не определяет, где произошло изменение периода [10]. Непрерывным вейвлет-преобразованием функции s(t) называют функцию двух переменных:

$$C(a,b) = \langle s(t) \cdot \psi(a,b,t) \rangle,$$

где вейвлеты  $\psi(a, b, t) = C_{(a,b)}(t)$  — масштабированные и сдвинутые копии порождающего вейвлета  $\psi(t)$ .

Таким образом, у функции двух аргументов C(a, b) аргумент a измеряется в единицах частоты, аргумент b — в единицах времени:

$$\psi_{ab}(t) = \left(1/\sqrt{|a|}\right) \cdot \psi((t-b)/a),$$



*Рис. 1.* Временные ряды наблюдений индексов солнечной активности: SSN, потоков *F*<sub>10.7</sub> на волне 10.7 см, *F*<sub>530</sub> на волне 530.3 нм, Mg II 286 нм и Flare index. Верхний индекс *N* означает, что данные наблюдений нормированы на их средние значения (вычисленные за время наблюдений)

$$C(a,b) = \left(\frac{1}{\sqrt{|a|}}\right) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \psi((t-b)/a) dt.$$

Мы проанализировали наблюдения основных индексов солнечной активности за последние три цикла. Относительные амплитуды вариаций этих индексов представлены на рис. 1. Видно, что у различных индексов относительные амплитуды вариаций сильно различаются — от долей процента до 3.5 раз. Индексы активности, описывающие рентгеновское излучение Солнца, не рассмотренные здесь, могут изменяться в цикле активности еще сильнее: на 2–3 порядка величины.

Наиболее распространенный способ представления результатов вейвлет-анализа — проекции коэффициентов вейвлетного спектра C(a, b) на частотно-временную плоскость (a, b) с изоуровнями, что позволяет проследить изменения коэффициентов на разных масштабах во времени, а также выявить картину локальных экстремумов этих проекций. Вейвлет-отображение ряда наблюдений SSN в виде проекции вейвлет-коэффициентов C(a, b) на частотно-временную плоскость представлено на рис. 2.

Используя плотность энергии  $E(a, b) = C^2(a, b)$ , можно определять локальную плотность энергии для заданных времени и частоты, а также анализировать временную динамику перераспределения энергии по масштабам, т.е. обмен энергией между составляющими разного масштаба в любой заданный момент времени. На рис. 3 мы демонстрируем трехмерное



*Рис. 2.* Вейвлет-отображение ряда наблюдений SSN в виде проекции вейвлет-коэффициентов *C*(*a*, *b*) на частотно-временную плоскость (*a*, *b*) с изоуровнями



*Рис. 3.* Трехмерное вейвлет-отображение рядов наблюдений SSN с использованием материнского вещественного (real-valued) вейвлета Морли

вейвлет-отображение того же ряда SSN, что и на рис. 2. Плоскость хи соответствует частотно-временной плоскости (*a*, *b*): *a* – *y* (периодичность, годы), *b* — *x* (время, годы), ось *z* отражает динамику  $C^{2}(a, b)$  (плотность энергии). Временная динамика перераспределения энергии процесса по масштабам указывает на то, что максимальное количество энергии сосредоточено на частотах, соответствующих 11- и 22-летнему солнечным циклам. Выбор вейвлета для использования в разложении на время-частоту является наиболее важной задачей. Этим выбором мы можем влиять на разрешение результата по времени и по частоте. Мы не можем изменить основные характеристики вейвлет-преобразования (низкие частоты имеют хорошее разрешение по частотам и плохое по времени; высокие имеют плохое разрешение по частотам и хорошее по времени), но мы можем несколько увеличить общее разрешение по частотам или по времени. Когда мы используем вейвлет Морле (реальная часть его затухающая функция косинуса), получаем высокое разрешение по частотам, что важно при обработке астрономических наблюдений [9, 10].

## 2. Результаты анализа рядов наблюдений глобальных индексов солнечной активности на разных временных шкалах

Как обсуждалось выше, индекс солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см выбран для анализа эволюции солнечной цикличности во времени из-за того, что он, по общему мнению, является наиболее объективным индексом глобальной солнечной активности и при этом тесно связан с потоками излучения от всего солнечного диска в различных спектральных диапазонах. В работах [9, 10] проанализированы возможности использования различных материнских вейвлетов для астрономических приложений, в частности для изучения рядов наблюдений индексов солнечной активности и для анализа излучения одного из квазаров. В результате был сделан вывод, что наиболее подходящим для обработки астрономических наблюдений является вейвлет Морли, который к тому же максимально приближен к классическому преобразованию Фурье для каждой отдельной точки на оси времени. Мы

провели сравнительный анализ временных рядов индекса солнечной активности  $F_{10.7}$  с использованием различных материнских вейвлетов: Дебеши 10, Симлета 8, Мейера, Гаусса 8, вещественного и комплексного вейвлетов Морли [11].

Материнский вейвлет Морли сочетает в себе характеристики плоской волны и функции Гаусса:

$$\psi(t) = e^{-t^2/a^2} \cdot e^{2i\pi t}$$

Сочетание этих двух функций в одном материнском вейвлете дает возможность успешно изучать характеристики временных вариаций астрономических сигналов от Солнца, квазаров и других объектов, несущих в себе выраженную циклическую составляющую. При изученни вариаций потоков от Солнца результаты обработки наблюдений с помощью вейвлета Морли оказались самыми удачными.

На рис. 4 приведены результаты вейвлет-анализа временных рядов среднемесячных  $F_{10,7}$ : по оси x время в годах; по оси у — цикличность, вычисленная в годах. Набор коэффициентов функции C(a, b)характеризует амплитуды вероятности локализации именно регулярной циклической составляющей сигнала в точке (a, b). Так как вейвлет-отображение Морли очень компактно по частоте, это позволяет нам наиболее точно (по сравнению с использованием других вейвлетов) провести определение локализации мгновенной частоты наблюдаемого сигнала. Как и в случае с анализом SSN (рис. 2), с максимальной достоверностью определяется основной цикл активности, и наиболее вероятное значение периодов этой цикличности составлет около 10 лет для  $F_{10.7}$ . На рис. 4 мы также видим несколько квазидвухлетних циклов внутри каждого 11-летнего цикла, продолжительность которых уменьшается с 3 лет до 2.5 года от начала к концу основного цикла активности, что подтверждает выводы из [12]. Отметим, что явление циклической переменности потоков излучения характерно также и для звезд солнечного типа спектральных классов G и K. У этих звезд наблюдаются четко выраженные циклы активности — аналоги 11-летнего и квазидвухлетнего циклов. При этом у звезд, так же как у Солнца, выявлена тесная взаимосвязь между потоками излучения фотосфер и излучением в мягком рентгеновском диапазоне [13].

Поток радиоизлучения на волне 10.7 см



Рис. 4. Вейвлет-отображение ряда среднемесячных значений F<sub>10.7</sub>

Анализ временного ряда  $F_{10.7}$  с помощью комплексного (complex-valued) вейвлета Морли помог выявить особенности эволюции основного 11-летнего цикла активности при анализе аномально длительного цикла 23. Длительность цикла 23, согласно наблюдениям локальных магнитных полей и SSN, составляет около 12.2 года, и подтвердить это при анализе с помощью других вейвлетов не получалось. В случае комплексного вейвлета Морли мы получаем зависимость уже от двух параметров:  $f_b$  — параметр, определяющий ширину вейвлет-фильтра, а  $f_c$  является локальным центром вейвлет-частоты. Материнская функция комплексного вейвлета Морли определяется следующим образом:

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \cdot e^{2i\pi f_c x} \cdot e^{-x^2/f_b}.$$

На рис. 5 показан анализ временных рядов среднемесячных значений  $F_{10.7}$  с помощью комплексного вейвлета Морли. В этом случае два дополнительных параметра изменяются в соответствии с поставленными задачами. Как и в случае с использованием Фурье-анализа, мы получаем массив коэффициентов, которые дают нам информацию не только о частотно-временном распределении амплитуды, но и о частотно-временном распределении фазы сигнала. Как оказалось, параметры материнского комплексного вейвлета Морли 1.5-1 лучше всего описывают эволюцию основного 11-летнего цикла за счет того, что подавляются циклы, менее выраженные и нерегулярные (квазидвухлетние



Поток радиоизлучения на волне 10.7 см

Рис. 5. Анализ временного ряда F<sub>10.7</sub> с использованием комплексного (complex-valued) вейвлета Морли 1.5-1

и циклы с меньшими периодами). Также мы видим, что период 23-го цикла активности получается около 12 лет по величине, что согласуется с наблюдениями магнитных полей и солнечных пятен.

Таким образом, построение вейвлет-отображений временных рядов индекса  $F_{10.7}$  позволяет нам не только выявить основные и дополнительные циклы активности, но и анализировать эволюцию их периодов во времени. Анализ цикличности солнечной активности, проведенный нами в [11], показал, что использование материнского вейвлета Морли наилучшим образом подходит для изучения солнечной цикличности. Циклы с меньшими амплитудами могут быть изучены с помощью вейвлетов, определенных таким образом, чтобы подавлялась основная цикличность.

Для выявления цикличности на пятилетнем и квазидвухлетнем (quasi-biennial) временных масштабах мы воспользовались рядом среднемесячных значений относительного числа солнечных пятен (данные наблюдений SSN 1950–2014 гг.). Был проведен вейвлет-анализ этих данных с помощью вейвлета Морли на более короткой временной шкале (рис. 6). Можно отметить циклы с 5.5-летним, квазидвухлетними и однолетним периодами. На существование 1.3-летней цикличности также указано в [14]. Цикличности с периодами 5.5 лет и квазидвухлетние ранее наблюдались у индекса солнечных пятен на протяжении последних десятков лет. Изучение этих цикличностей затруднялось тем, что их амплитуды вариаций гораздо меньше, чем у основного 11-летнего цикла. К тому же периоды этих малоамплитудных циклов существенно изменялись во время основного цикла, например отмечалось, что периоды квазидвухлетних циклов уменьшались с величины в 3.5 года до 2 лет несколько раз в течение основного 11-летнего цикла [15]. Этот факт нестабильности периодов циклов с меньшей амплитудой исключал возможность анализа солнечных данных с помощью Фурье-преобразования. Для изучения таких активно эволюционирующих циклов подходит именно метод вейвлет-анализа.

В связи с интересом к изучению поведения солнечной активности в прошлом [8, 16, 17] нам представляется важным анализ рядов солнечных наблюдений на вековой и более длительной временных шкалах. На рис. 7 представлен вейвлет-анализ ряда среднегодовых значений SSN (с 1700 по 2014 г.) на масштабе циклов с периодами до 150 лет с использованием вещественного вейвлета Морли (real-valued). Кроме основного 11-летнего цикла мы видим полувековые и вековые циклы и их эволюцию





Рис. 6. Вейвлет-отображение временного ряда SSN на масштабе периода циклов менее 6 лет. Используется вещественный (real-valued) вейвлет Морли



*Рис.* 7. Частотно-временной анализ относительного числа солнечных пятен. Вейвлет-отображение временного ряда среднегодовых значений SSN на масштабе периода циклов до 150 лет

во времени. С 1700 по 1850 г. относительное число солнечных пятен определялось согласно косвенным данным наблюдений за солнечной активностью. После 1850 г. по настоящее время проводятся прямые наблюдения относительного числа солнечных пятен, с 1950 г. — потоков радиоизлучения на волне 10.7 см и других глобальных солнечных индексов.

На рис. 8 представлены исследуемые нами с помощью вейвлет-анализа следующие индексы солнечной активности: вспышечный индекс Flare index, число вспышек Counts of flares, потоки в корональной линии 530.3 нм и хромосферный индекс Mg II 280 нм. На рис. 8 демонстрируются вейвлет-отображения рядов наблюдений индексов активности, полученные с использованием вещественного вейвлета Морли. Это позволяет нам сравнить вейвлет-отображения индексов активности, характеризующие потоки излучения, формирующиеся на различных высотах в солнечной атмосфере. Для всех индексов можно проследить эволюцию во времени как основного 11-летнего цикла, так и циклов с 5.5-летним периодом и квазидвухлетних. Исключение — анализ потока в хромосферной линии Mg II 280 нм, когда мы можем видеть только 11-летний цикл. Это связано с тем, что относительные амплитуды колебаний в цикле активности для индекса Mg II очень малы и составляют около 0.1-0.2%. Также нужно

учитывать тот факт, что приходится приводить данные наблюдений, полученные с помощью различной аппаратуры на нескольких спутниках, к единому стандарту, и это увеличивает вес относительных погрешностей. В результате оказалось невозможным провести качественный частотно-временной анализ рядов наблюдений хромосферного индекса Mg II. Этот факт является косвенным ограничением применимости метода: при отношении сигнала к шуму ниже пороговой величины, определяемой в каждом конкретном случае опытным путем, применение метода вейвлет-анализа не дает хороших результатов.

Метод вейвлет-анализа позволяет определять наиболее вероятные значения доминирующих частот в рядах наблюдений (если таковые имеются), а также их эволюцию со временем. При этом встает вопрос о точности определения наиболее вероятных значений искомых доминирующих частот. Мы провели косвенные оценки точности определения вероятности того, что в данный момент времени доминирующая частота имеет максимальное по сравнению с другими частотами значение. В нашем случае вероятность определяется величиной вейвлет-коэффициента C(a, b), рассчитанной для определенного момента времени (a соответствует периодичности, измеряемой в годах; b — времени, измеряемому в годах).



*Рис. 8.* Частотно-временной анализ индексов солнечной активности: *F*<sub>530</sub>, Flare index, Counts of flares, Mg II 280 нм. Вейвлет-отображения (вещественный вейвлет Морле) представлены в виде проекции вейвлет-коэффициентов *C*(*a*, *b*) на частотно-временную плоскость (*a*, *b*) с изоуровнями

На рис. 9 приведены разрезы (локальные отображения) вейвлет-коэффициентов C(a, b) для фиксированных моментов времени. Использовался вещественный вейвлет Морли для рядов наблюдения SSN, см. рис. 2. Проанализированы три даты наблюдений индекса SSN в 23-м солнечном цикле: во время минимума активности в середине 1996 г., на фазе роста в середине 1998 г. и в максимуме активности в середине 2001 г. Форма кривых, описывающих разрез массива вейвлет-коэффициентов C(a, b), подобна кривым, описывающим нормальное распределение отклонений от среднего. Это свойство локальных отображений вейвлет-коэффициентов C(a, b) определяется материнским вейвлетом Морли, который сочетает в себе характеристики плоской волны и функции Гаусса. Таким образом, на уровне полуширины кривой из рис. 8 мы получаем оценку точности определения величины периода цикла, соответствующую среднеквадратичному отклонению нормального распределения, равную 1  $\sigma$ .



Рис. 9. Разрезы массива вейвлет-коэффициентов С(a, b) для рядов наблюдения SSN для трех фиксированных дат наблюдения 23-го солнечного цикла: для фазы минимума (1996.5), фазы роста (1998.5) и фазы максимума (2001.5)

Видно, что идеально соответствует величине цикла в 10-11 лет вейвлет-отображение для фазы роста — середины цикла (1998 г.). В этом случае и среднеквадратичное отклонение минимально:  $1\sigma \sim 1$  год. В минимуме и в максимуме цикла (1996 и 2001 г., см. рис. 8) экстремумы локальных вейвлет-отображений соответствуют значению периода основного цикла меньшему, чем 10 лет. Анализ разрезов вейвлет-коэффициентов C(a, b) для фиксированного момента времени — второго максимума в начале 2002 г. – показал, что локальное вейвлет-отображение основного периода даже разбивается на три периодичности от 6 до 14 лет, что подтверждает влияние стохастических процессов на регулярную локальную цикличность в моменты минимумов и максимумов циклов. Кроме того, разброс вейвлет-коэффициентов вокруг среднего значения существенно увеличивается по сравнению с серединой цикла в минимуме и максимуме цикла (среднеквадратичное отклонение  $1\sigma \sim 1.5$  г.), что согласуется с выводами [2]. В середине цикла можно также отчетливо видеть локальные максимумы

с меньшей амплитудой на 5.5-летнем и квазидвухлетнем масштабах. Таким образом, значения периода цикла в 10–10.5 года, определяемые из наблюдений в XX в., мы получаем в результате вычисления вейвлет-коэффициентов C(a, b) на фазах роста и спада основного цикла вне минимумов и максимумов.

#### Заключение

1. Для всех рассмотренных индексов активности длительность основного цикла совпадает с длительностью 11-летнего цикла Швабе–Вольфа (см. рис. 2, 4, 5, 7, 8). Наряду с этим максимальным по амплитуде основным циклом активности вейвлет-анализ дает возможность выявить периодичности значительно меньшие по амплитуде. Мы подтвердили существование 5.5-летней и квазидвухлетней цикличностей не только у индекса солнечных пятен, но и у  $F_{10.7}$ ,  $F_{530}$ , Flare index и Counts of flares. Для всех индексов активности результаты вейвлет-преобразования в основном достаточно сходны между собой, но есть и некоторые отличия, особенно в периоды максимумов и минимумов 11-летних циклов.

2. Результаты исследования эволюции цикличности  $F_{10.7}$  с использованием вейвлетов Морли и Гаусса лучше согласуются с наблюдениями, чем при использовании других материнских вейвлетов, в частности Мейера, Дебеши и Симлета.

3. Частотно-временной анализ рядов наблюдений солнечной активности с помощью различных материнских вейвлетов показывает, что среднее значение длительности цикла Швабе–Вольфа составляет около 10.2 года в течение всего ХХ в. В случае 23-го цикла активности анализ рядов наблюдений *F*<sub>10.7</sub> с помощью комплексного вейвлета Морли дает реально наблюдаемое значение длительности аномального 23-го цикла, равное 12.5 года.

#### Список литературы

- Rozgacheva I., Bruevich E. // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2002. 21, N 1. P. 27.
- Bruevich E., Bruevich V., Yakunina G. // J. Astrophys. Astron. 2014. 35, N 1. P. 1.
- 3. *Kruger A*. Introduction to Solar Radio Astronomy and Radio Physics. Dordrecht, Holland. 1979.
- Donnelly R.F., Heath D.F., Lean J.L., Rottman G.J. // J. Geophys. Res. 1983. 88. P. 9883.
- Chapman R.D., Neupert W.M. // J. Geophys. Res. 1974. 79. P. 4138.
- Tapping K.F., De Tracey B. // Solar Phys. 1990. 127. P. 321.
- 7. NOAA, NGDC. Space Weather. Solar Indices Data. 2014.
- Morozova A.L., Pudovkin M.I., Black J.V. // Geomagnetism and Aeronomy. 1999. 39, N 2. P. 40.
- 9. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов. СПб., 2008.
- 10. *Черных Ю.В.* // Труды СПИИРАН. СПб., 2003. **3**, № 1.
- 11. Bruevich E., Bruevich V., Yakunina G. // Sun and Geosphere. 2014. 8, N 2. P. 83.
- 12. Бруевич Е.А., Кононович Э.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011. № 1. С. 70 (Bruevich E.A., Kononovich E.V. // Moscow University Phys. Bull. **66**, N 1. P. 72).

- Bruevich E., Alekseev I. // Astrophysics. 2007. 50, N 2. P. 187.
- *пруд В.Е.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. **43**, № 3. С. 161. 16. *Наговицын Ю.А.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2001.
- 14. Лившиц И.М., Обридко В.Н. // Астрон. журн. 2006. 83, № 11. С. 1031.
- **41**, № 5. С. 711. 17. *Наговицын Ю.А.* // Астрофизический бюллетень. 2008. **63**, № 1. С. 45.
- 15. Иванов-Холодный Г.С., Могилевский Э.И., Черто-

### The cyclic activity of the Sun from observations of the activity indices at different time scales

# E. A. Bruevich<sup>a</sup>, G. V. Yakunina<sup>b</sup>

Sternberg State Institute of Astronomy, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia. E-mail: <sup>a</sup>red-field@yandex.ru, <sup>b</sup>yakunina@sai.msu.ru.

With the time-frequency analysis of the series of observations of one of the global indices of solar activity, viz., the radio flux  $F_{10.7}$  at a wavelength of 10.7 cm (2.8 GHz), the most probable value of the main cycle period has been determined. This value is 10.2 yr, which is consistent with the generally accepted estimates. Simultaneously with the main cycle of activity, several low-amplitude cycles with cyclicity periods from 1.3 to 100 yr were identified. With the method of continuous wavelet transform with Morlet mother wavelets, we analyzed the other solar indices that are associated with the radiation at different heights in the solar atmosphere: the relative number of sunspots, SSN, the chromospheric index, Mg II, at 280 nm, the fluxes in the coronal line at 530.3 nm,  $F_{530}$ , the Flare Index, and the index of a total number of flares, Counts of flares. The obtained time–frequency characteristics turned out to be generally similar. Differences in the results for the solar indices occur during the strengthening of stochastic processes in the maxima and minima of the main cycle.

*Keywords*: solar activity, activity indices, solar activity cycles. PACS: 96.60. *Received 3 April 2015*.

English version: Moscow University Physics Bulletin 4(2015).

#### Сведения об авторах

1. Елена Александровна Бруевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-22-45, e-mail: red-field@yandex.ru.

2. Галина Валентиновна Якунина — науч. сотрудник; тел.: (495) 939-19-73, e-mail: yakunina@sai.msu.ru