УДК 533.933; 533.932

В. М. Журавлев, С. В. Летуновский

АНАЛИЗ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА НА ОСНОВЕ РЯДА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА (I. Методика)[1]

Аннотация. Представлены результаты исследования эволюции статистических характеристик ряда чисел Вольфа и ряда групп пятен на масштабах их изменчивости порядка 100 лет. Строится полуэмпирическая модель вероятностного распределения чисел Вольфа. Излагается метод моментов в применении к задаче вычисления эволюции параметров распределения чисел Вольфа.

Ключевые слова: солнечная активность, числа Вольфа, статистика, эволюция распределения, метод моментов.

Abstract. Statistical characteristics of Volf number and number of groups sequence distributions and their evolution in time on scales about 100 years are investigated. The statistical semi-empirical model this distributions are represented. The statistical moment's method in application to a problem of evaluation Volf numbers distribution parameters is discussed.

Keywords: solar activity, Volf numbers, statistics, distribution evolution, moments method.

Введение

Задача исследования солнечной активности, кроме важности в выяснении физических механизмов, управляющих динамикой процессов, происходящих на Солнце, имеет большое значение для выяснения и прогноза влияния этой изменчивости на изменения климата на Земле. Такие исследования особенно важны, например, в связи с наблюдаемым сдвигом средней температуры на Земле в сторону ее увеличения, что не находит пока однозначного объяснения. Решение общей задачи предсказания солнечной активности осуществляется в настоящее время множеством различных способов, ориентированных на выделение и анализ различных периодов ее изменчивости. Поскольку одной из наиболее ярко выраженных квазипериодических составляющих изменчивости солнечной активности является 11-летний цикл, то имеется множество работ, связанных с решением задачи предсказания очередного солнечного квази-одиннадцатилетнего цикла на основе информации о предыдущих. Но в изменчивости характеристик самого 11-летнего цикла обнаруживаются как более короткие периодичности (например, 2-летняя составляющая), так и длинно-периодические изменения, которым посвящено также множество работ [1–22] (см. также библиографию там). Цель большинства работ состоит в отыскании прогностических параметров, исследуя эволюцию которых можно с той или иной степенью надежности предсказать изменение солнечной активности в очередном цикле. Большинство проведенных исследований опирается на данные в виде чисел Вольфа и использует различные типы параметров, которые могут быть оценены из самого ряда.

[1] Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект 08-01-97013-р_поволжье_а.

Это и авторегрессионные модели [11], различные типы индексов, например: индекс, связанный с числом групп пятен [13]; параметр экспоненты Харста [16] и т.д. В значительно меньшей степени в современных работах уделяется внимание исследованию изменчивости непосредственно параметров статистического распределения чисел Вольфа. В работе [23] приведены гистограммы распределения ряда чисел Вольфа, восстановленного по палеоданным для больших периодов времени. Однако на таких больших масштабах времени, как тысячи лет, значения индексов солнечной активности являются малонадежными и подвержены значительному статистическому разбросу. Поэтому такую работу имело бы смысл проводить для данных, которые установлены с достаточной надежностью. В известной монографии [10] исследован целый набор статистических свойств различных характеристик параметров солнечных пятен на Солнце, однако вероятностному распределению чисел Вольфа практически внимания не уделялось. Вместе с тем можно ожидать, что исследование самого вероятностного распределения ряда чисел Вольфа может дать полезную информацию об эволюции солнечной активности. Эти надежды основываются на том, что вероятностные распределения содержат в себе всю детерминированную информацию о случайном процессе.

Вместе с тем при исследовании вероятностного распределения такого случайного процесса, как ряд чисел Вольфа, необходимо отдавать себе отчет, что сам этот процесс не стационарен и параметры распределения могут зависеть от времени. Именно зависимость от времени параметров распределения может дать полезную информацию об изменениях в состоянии термодинамической машины Солнца. Однако для этого необходимо иметь возможность связывать параметры распределения, например, его моменты, с какими-либо параметрами физической модели, описывающей такую изменчивость.

В настоящей работе проводится анализ ряда чисел Вольфа с помощью относительно простой полуэмпирической модели, основанной на гипотезе о существовании двух несовместных механизмов возникновения солнечных пятен. Один из них соответствует некоторому равновесному процессу, а второй интерпретируется как «взрывной». Обоснование такого представления приводится в данной статье. Исследования предпринимаются с целью показать возможность извлекать из такой модели существенную информацию о характеристиках солнечной термодинамической машины как целого. Это позволяет также выявить ряд особенностей в эволюции солнечной активности, которые связаны с глобальными изменениями в функционировании этой машины на больших масштабах времени, значительно превышающей характерный временной масштаб солнечного цикла. В отличие от плавных квазипериодических изменений самих чисел Вольфа, обнаруживаемые изменения статистических характеристик вероятностного распределения имеют отрезки времени, когда параметры меняются очень быстро – практически скачкообразно. Быстро изменяющиеся процессы на Солнце обычно связывают со вспышками, характерный временной масштаб которых оценивается, как правило, минутами или десятками минут. Изменения в статистических характеристиках среднемесячных чисел Вольфа, как кажется, не могут быть связаны со вспышечной активностью. Однако можно предположить, что вспышки типа вспышки 1859 г. могут быть связаны с существенными изменениями термодинамической системы Солнца, поскольку энергия, выбрасываемая в таких вспышках, уже может быть сравнимой с энергией глобальных процессов на Солнце. В настоящей работе проводится исследование параметров предложенной модели в течение последних 250 лет. Основным набором данных, который используется для анализа изменчивости активности Солнца, выбран ряд ежемесячных чисел Вольфа с 1749 по 2009 г., имеющийся на Интернет-сайте [1]. Вспомогательным набором данных, который позволяет увеличить интервал, на котором можно получить оценки исследуемых параметров, является ряд ежемесячных чисел групп пятен. Этот ряд имеется на том же Интернет-сайте, но, по всей видимости, менее надежен. Однако в силу того, что в работе анализируются не отдельные значения рядов, а их усредненные за 100 лет статистические характеристики, флуктуации оценок оказываются не очень существенными. Задачей этого исследования является выявление скрытых механизмов, управляющих динамикой солнечной активности на больших масштабах времени, и отыскание новых прогностических параметров, позволивших бы сделать предсказания о характере возможных изменений в функционировании солнечной термодинамической системы.

1. Скользящие ряды чисел Вольфа

Для выявления изменчивости статистических характеристик ряда чисел Вольфа необходимо иметь множество рядов, сдвинутых во времени, для каждого из которых строится гистограмма распределения. Для этого в данной работе используется метод скользящих рядов. Метод скользящих рядов сводится к сравнительному исследованию свойств рядов чисел Вольфа $W_a = \{w_{a,i}\}_{i=1}^{N}$, полученных из полного ряда $W = \{W_i\}_{i=1749,1}^{2009,4}$ общей длиной $N_0 = 3115$ с помощью процедуры выделения части ряда заданной длины N, начиная с некоторого элемента ряда с номером a:

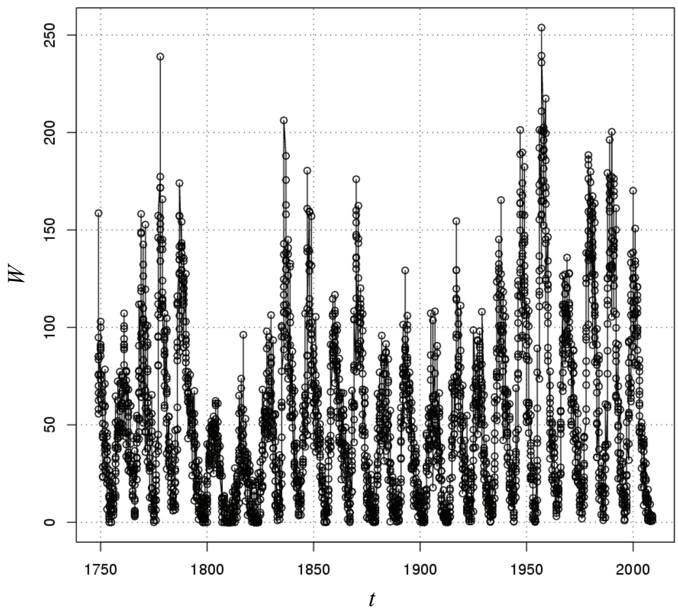
$$w_{a,i} = W_{as+(i-1)},\ i = 1, 2, \ldots, N.$$

В этом соотношении целое число a определяет номер каждого ряда в создаваемом многомерном наборе данных: $a = 0, 1, 2, \ldots, M$. Фактически номер a связан со временем $t_a = a\Delta t$ между начальными значениями рядов, которое можно рассматривать в качестве реального параметра, позволяющего упорядочить во времени изменения средних характеристик отдельных рядов W_a. Целое число s определяет величину временного сдвига между началами отдельных рядов. Числа M, s и N связаны между собой и общей длиной ряда N_0 соотношением $s = [(N_0 - N)/M]$, $[k]$ – целая часть числа k. Обозначим через $\overline{W}_N(a)$ и $\sigma_N(a)$ среднее значение ряда с номером сдвига a длиной N.

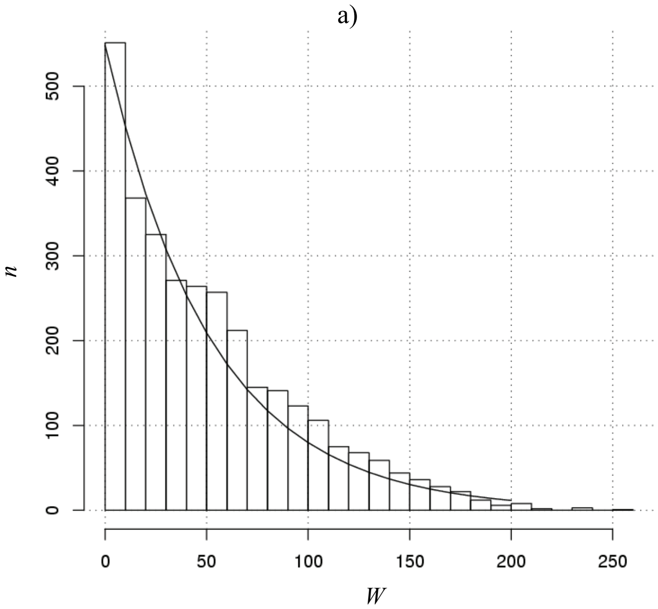
2. Распределение вероятностей среднемесячных чисел Вольфа

Гистограмма распределения вероятности появления определенного числа пятен (рассчитанных с помощью формулы Вольфа) в течение месяца, вычисленная по всему ряду (рис. 1), достаточно хорошо описывается показательным распределением следующего вида:

$$\rho_0(n) = \lambda e^{-\lambda n}. \tag{1}$$



а)



б)

Рис. 1. Числа Вольфа: а – ежемесячный ряд; б – гистограмма

Это устанавливается с помощью критерия χ^2 и, собственно, наглядно подтверждается близостью среднего значения полного набора ежемесячных чисел Вольфа $\bar{W}$ к стандартному отклонению этого же полного набора σ: $\bar{W} = 51{,}9$, $\sigma = 44{,}3$. Для теоретического распределения (1) эти величины должны совпадать точно: $\overline{w_0}(t) = \sigma_0 = \lambda^{-1}$. Некоторое различие в величинах $\bar{W}, \sigma$ указывает на существование дополнительной составляющей в истинном распределении, которое несколько искажает распределение (1). Длина исследуемого ряда в целом и отдельных скользящих рядов вполне достаточна для того, чтобы выявить искажения в структуре распределения со временем и установить форму дополнительной составляющей с требуемой для прогноза степенью надежности.

Для учета этого искажения в данной работе предлагается модель в форме смеси двух распределений, одним из которых является (1), а вторым – некоторое распределение, которое можно выбрать, изучая результаты моделирования.

3. Особенности эволюции моментов распределения чисел Вольфа

Расчет параметров распределения будет проводиться в данной работе на основе метода моментов. Прежде чем переходить к анализу эволюции распределений чисел Вольфа, рассмотрим особенности в долговременной эволюции самих моментов распределений, на основе которых и строятся оценки параметров распределения $\rho(n,t)$. На рис. 2 и 3 представлены графики изменения оценок моментов распределения $\rho(n,t)$ скользящих рядов. Наиболее заметными изменениями со временем оценок математического ожидания распределения $\rho(n,t)$ (рис. 2) является монотонный рост этой величины. Если определять момент времени, к которому относится оценка среднего по началу скользящего ряда, то рост среднего значения начинается с середины XIX в. и остается таковым и для последнего скользящего ряда с началом в 1909 г.

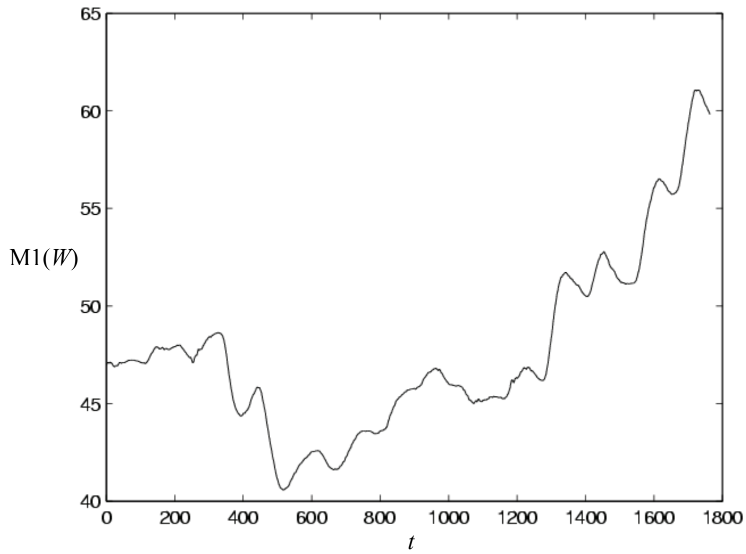


Рис. 2. Эволюция среднего значения скользящих рядов чисел Вольфа.
По оси абсцисс обозначен номер месяца, начиная с января 1749 г.

Аналогичный, но с некоторого момента более крутой рост наблюдается и во втором моменте (рис. 3,а). Основной вывод, который можно сделать, исходя из наблюдаемого одновременного роста среднего значения чисел Вольфа и второго момента, состоит в том, что со временем возрастает не только вероятность наблюдения все большего числа пятен, но и вероятность флуктуаций этой величины от среднего.

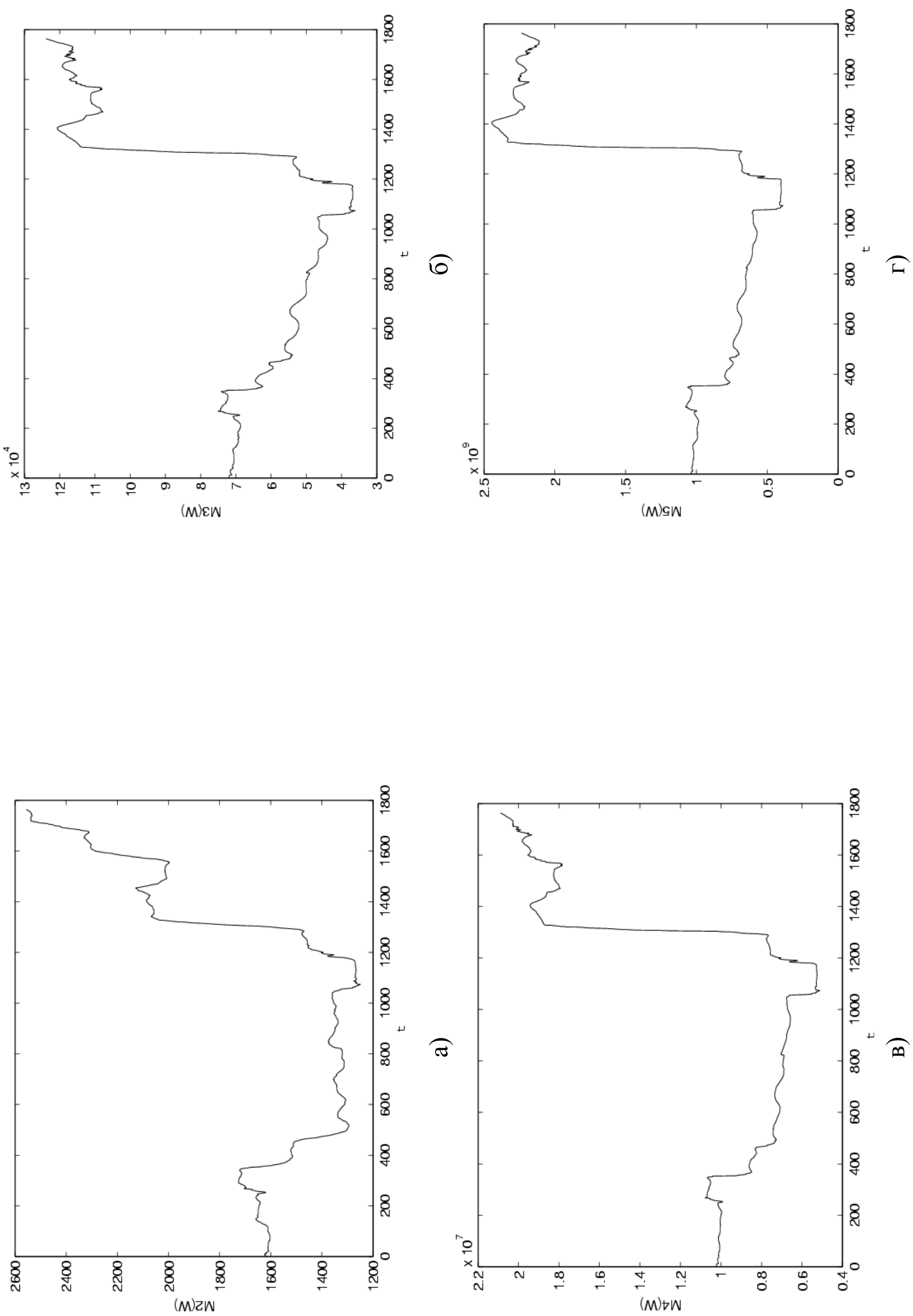


Рис. 3. Эволюция центральных моментов скользящих рядов чисел Вольфа: а – $m = 2$; б – $m = 3$; в – $m = 4$; г – $m = 5$

Поскольку основной составляющей в распределении $\rho(n,t)$ является показательное распределение, то это означает, что величина стандартного отклонения, характеризующая среднестатистическое отклонение от среднего, почти равна самому среднему. В свою очередь это означает, что с достаточно большой вероятностью в ежемесячном исчислении могут наблюдаться не только периоды большого числа пятен, но и периоды с числом пятен, практически равным нулю. Это формально объясняет со статистической точки зрения наблюдаемое в начале текущего цикла солнечной активности аномально низкое число пятен, которое в феврале 2010 г. сменилось резким увеличением числа пятен и вспышек. Такое поведение характерно для процесса с показательным распределением.

Эволюция старших моментов представлена на рис. 3. Наиболее существенным элементом в эволюции старших моментов является наличие скачка в XIX в. Этот скачек прослеживается на всех моментах порядка $k > 1$.

Поскольку моменты оценивались на интервале времени 100 лет, то абсолютное положение скачка на графиках моментов (рис. 3) установить можно лишь, связав какой-либо известный факт из истории наблюдения солнечной активности с характеристиками эволюции исследуемых параметров. В качестве такого временного маркера можно избрать известную мощную вспышку 1859 г. Эта вспышка хорошо прослеживается по данным химических маркеров (нитратный след [24, 25]) во льду Антарктики и Гренландии. Согласно графикам на рис. 3 наиболее значительный скачок в моментах распределения чисел Вольфа наблюдается спустя почти сто лет от начала ряда, датируемого 1749 г. Скачок в моментах распределений как раз приходится на время вблизи вспышки 1859 г., если в качестве момента, к которому привязываются значения моментов, полученные на отрезках длиной 100 лет, выбрать начало этого отрезка. Сам факт того, что в параметрах распределения изменения происходят, начиная с момента вспышки, указывает на то, что само распределение формируется в результате происходящих изменений на Солнце и является их следствием и индикатором. В результате мы получаем в руки новый тип индексов, характеризующих скачкообразные изменения в состоянии Солнца. Однако сами моменты распределения чисел Вольфа с физической точки зрения мало информативны. Для получения более информативных параметров далее предлагается модель вероятностного распределения чисел Вольфа, на основании которой можно уже строить гипотезы именно о физических механизмах, управляющих вспышками.

4. Модель распределения чисел Вольфа

Модель распределения, используемая далее, имеет следующий вид:

$$\rho_w(n) = \left(1 - p(t)\right)\lambda_0(t)e^{-\lambda_0(t)n} + p(t)\rho_1(n,t). \tag{2}$$

Это распределение можно интерпретировать как полную вероятность появления определенного числа пятен под действием двух несовместных механизмов. Вероятность срабатывания одного из этих механизмов (основного) равна $1 - p(t)$, а второго $p(t)$. Плотность вероятности появления w чисел Вольфа при срабатывании первого механизма описывается показательным распределением $\rho_0(w,t) = \lambda_0(t)e^{-\lambda_0(t)n}$, а второго – $\rho_1(n,t)$, функциональный вид которого еще следует выбрать на основе анализа эмпирического распределения ряда чисел Вольфа.

Показательное распределение $\rho_0(w,t)$ можно интерпретировать как распределение по энергиям, если при действии этого механизма каждое появившееся пятно имеет некоторое слабо меняющееся среднее значение энергии E_0. В этом случае показательное распределение есть распределение Больцмана по энергиям. Формально мы можем при такой интерпретации считать, что $\lambda_0(t) = E_0(t)/kT_*(t)$, где $T_*(t)$ – некоторая условная температура системы. Эта интерпретация не является достаточно обоснованной и приводится здесь лишь качестве иллюстрации возможных типов объяснения этой части распределения.

Как видно из рис. 1,б, наиболее существенные отклонения от показательного распределения наблюдаются в области чисел Вольфа порядка 50–80 и практически исчезают при больших и малых (вблизи нуля) значениях w. Это означает, что второй механизм срабатывает реже, но порождает сразу множество пятен, число которых находится вблизи значения 50–80, которое должно соответствовать модели распределения $\rho_1(n,t)$. В силу этого мы можем предполагать, что такой механизм носит «взрывной» характер, а само распределение $\rho_1(n,t)$ можно аппроксимировать либо распределением типа максвелловского:

$$\rho_1^{(\mathrm{I})}(n,t;q) = Z_1 n^q e^{-n^2/2\sigma^2(t)}, \tag{3}$$

либо распределением следующего вида:

$$\rho_1^{(\mathrm{II})}(n,t) = Z_1 n^q e^{\lambda_1(t)n}, \tag{4}$$

с параметрами $q, \lambda_1(t)$ и $\sigma(t)$, которые должны вычисляться из экспериментальных данных. К этим параметрам добавляется еще и параметр $p(t)$, который наиболее важен с физической точки зрения, поскольку определяет вероятность срабатывания взрывного механизма в солнечной активности. Для оценивания этих параметров воспользуемся методом моментов [26, 27].

5. Метод моментов

Метод моментов базируется на вычислении параметров теоретических распределений на основе оценок моментов случайной величины по эмпирическим данным. Распределения $\rho_0(n,t)$ и $\rho_1^{(\mathrm{I,II})}(n,t;q)$ содержат по одному параметру (q считается заданным). Еще один параметр $p(t)$ принадлежит смеси распределений $\rho(n,t)$. Таким образом, для построения распределения $\rho(n,t)$ требуется вычислить три параметра. Для этого согласно методу моментов достаточно вычислять три момента эмпирического распределения.

Предполагая, что $\rho_1(n,t)$ нормировано, получаем следующие соотношения для параметров полного распределения:

$$m_1(t) = \overline{w}(t) = (1 - p(t))\overline{w}_0 + p(t)\overline{w}_1; \tag{5}$$

$$m_2(t) = \sigma^2(t) = (1 - p(t))[\sigma_0(t) + (\overline{w}(t) - \overline{w}_0(t))^2] + p(t)[\sigma_1(t) + (\overline{w}(t) - \overline{w}_1(t))^2]; \tag{6}$$

$$m_3(t) = (1-p(t))[2\lambda_0^{-3}(t) + (\overline{w}(t) - \overline{w}_0(t))^3] + p(t)[A_1(t) + (\overline{w}(t) - \overline{w}_1(t))^3], \quad (7)$$

где

$$\overline{w}_1(t) = \int_0^\infty n\rho_1(n,t)dn, \ \sigma_1^2(t) =$$

$$= \int_0^\infty (n - \overline{w}_1(t))^2 \rho_1(n,t)dn, \ A_1(t) = \int_0^\infty (n - \overline{w}_1(t))^3 \rho_1(n,t)dn .$$

В этих уравнениях в силу того, что распределение $\rho_0(n,t)$ имеет вид (1), $\overline{w}_0(t)$ и $\sigma_0(t)$ выражаются через одну функцию $\lambda_0(t)$:

$$\overline{w}_0(t) = \sigma_0(t) = \lambda_0^{-1}(t).$$

Эти уравнения содержат пять неизвестных функций: $p(t)$, $\lambda_0(t)$, $\overline{w}_1(t)$, $\sigma_1(t)$, $A_1(t)$. Для случая выбора распределения $\rho_1(n,t)$ в форме (3) и (4), параметры $\overline{w}_1(t), \sigma_1(t)$, $A_1(t)$ связаны между собой так, что только один из них оказывается произвольным. Для случая в качестве свободного параметра удобно выбирать $\lambda_1(t) = n_0^{-1}$, а в случае (4) – параметр $n_0(t)$.

Поскольку в этом случае число параметров оказывается равным 3, то система (5)–(7) из трех уравнений позволяет рассчитать все параметры двух распределений и вероятность взрыва $p(t)$. Вычисления проводились для каждого ряда из набора скользящих рядов с шагом в один месяц. При этом численно решалась система из трех алгебраических уравнений суммарного порядка, равного 7. Из корней этого уравнения отбирались корни, удовлетворяющие определенным требованиям.

Заключение

Разработан метод анализа эволюции параметров вероятностнорго распределения чисел Вольфа с целю выяснения долговременной эволюции солнечной активности. Предлагаемый подход строится на методе моментов [26, 27] в сочетании со специальным выбором смеси распределений, которые наилучшим образом характеризуют форму распределения чисел Вольфа. Важным элементом такого подхода является интерпретация смеси распределений как полной вероятности наблюдения пятен. Это позволяет характеризовать отдельные элементы распределения как вероятности несовместных механизмов образования пятен. Одно из распределений, как вероятность появления пятен в «равновесии», а второе, как неравновесную, или взрывную, составляющую. Метод предназначен для проведения исследований ряда чисел Вольфа, результаты которых изложены в следующей работе.

Список литературы

1. [Электронный ресурс] FTP сервер NASA. – URL: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_ NUMBERS/
2. [Электронный ресурс] Basu S., Antia H. M. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0001294v1

3. [Электронный ресурс] Petrovay K. – URL: http://arxiv.org;articl-id: //arXiv:[astro-ph] 0010096v2
4. [Электронный ресурс] Stefano Sello. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0010106v1
5. **Zieeba, S.** Cover illustration: First Doppler image of a solar-type G dwarf / S. Zieeba, J. Maslowski, A. Michalec, A. Kulak // Astronomy & Astrophysics. – 2001. – V. 377. – № 1. – P. 297–311.
6. [Электронный ресурс] Dean-Yi Chou, Alexander Serebryanskiy. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0405175v1
7. **Atac, T.** Flare Index During the Rising Phase of Solar Cycle 23 / T. Atac, A. Ozguc // Solar Physics. – 2004. – V. 198. – № 2. – P. 399–407.
8. [Электронный ресурс] R. Cameron and M. SchEussler. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0612693v1
9. [Электронный ресурс] Arnab Rai Choudhuri, Piyali Chatterjee, Jie Jiang. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:astro-ph/0701527v1
10. **Витинский, Ю. И.** Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца / Ю. И. Витинский, М. Копецкий, Г. В. Куклин. – М. : Наука, 1986. – 294 с.
11. [Электронный ресурс] K. M. Hiremath. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph]0704.1346v1
12. [Электронный ресурс] J. Bushby, Steven M. Tobias. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0704.2345v1
13. [Электронный ресурс] A. G. Tlatov. – URL: http://arxiv.org;articl-id: //arXiv:[astro-ph]0706.1624;arXiv:[astro-ph] 0703681
14. [Электронный ресурс] M. SchEussler. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0712.1917v1
15. [Электронный ресурс] R. Cameron, M. SchEussler. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0806.2833v1
16. [Электронный ресурс] A. Kilcik1, C.N.K. Anderson, J.P. Rozelot, A. Ozguc. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0811.1708v5
17. [Электронный ресурс] P.A.Semi. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0903.5009
18. [Электронный ресурс] D. Salabert, R. A. Garcгэa, P. L. Pallгe1,S. J. Jimгenez-Reyes. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0907.3888v1
19. [Электронный ресурс] Leonid V. Didkovsky, Darrell L. Judge, Seth R. Wieman. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0911.0870v1
20. **Joshi, B.** Periodicities in sunspot activity during solar cycle 23 / Bhuwan Joshi, P. Pant1, P. K. Manoharan // Astronomy & Astrophysics. – 2006. – V. 452. – № 2. – P. 647–650.
21. [Электронный ресурс] L. Rogers, Mercedes T. Richards, Donald St. P. Richards. – URL: http://arxiv.org;articl-id: arXiv:[astro-ph] 0606426v3
22. **Shea, M. A.** History of Energetic Solar Protons for the Past Three Solar Cycles Including Cycle 22 Update / M. A. Shea, D. F. Smart // Solar Physics. – 1990. – June. – V. 127. – P. 297–320.
23. [Электронный ресурс] I. G. Usoskin. A History of Solar Activity over Millennia. – URL: http://www.livingreviews.org/lrsp-2008-3
24. **Кочаров, Г. Е.** Естественные архивы солнечной активности и термоядерной истории Солнца за последние миллионы лет / Г. Е. Кочаров // Соросовский образовательный журнал. Физика. – 2000. – № 1. – С. 91–95.
25. **Gisela, A. M.** Dreschhoff, Edward J. Zeller Evidence Of Individual Solar Proton Events in Antarctic Snow / A. M. Gisela // Solar Physics. – 1990. – V. 127. – P. 333–346.

26. **Митропольский, А. К.** Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – М. : Наука, 1971. – 576 с.
27. **Крамер, Г.** Математические методы статистики / Г. Крамер. – М. : Мир, 1975. – 625 с.

Журавлев Виктор Михайлович
доктор физико-математических наук, профессор, кафедра теоретической физики, Мордовский государственный педагогический институт им. М. Е. Евсевьева

E-mail: zhvictorm@mail.ru

Zhuravlev Viktor Mikhaylovich
Doctor of physical and mathematical sciences, professor, sub-department of theoretical physics, Mordovia State Pedagogical University named after M. E. Evsevyev

Летуновский Сергей Владимирович
старший преподаватель, кафедра физики, Ульяновский государственный университет (филиал в г. Димитровграде)

E-mail: grayser@bk.ru

Letunovsky Sergey Vladimirovich
Senior lecturer, sub-department of physics, Ulyanovsk State University (affiliated branch in Dimitrovgrad)

УДК 533.933; 533.932

Журавлев, В. М.

Анализ долговременной эволюции активности солнца на основе ряда чисел Вольфа (I. Методика) / В. М. Журавлев, С. В. Летуновский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2010. – № 4 (16). – С. 120–130.