

УДК 510.22: 523.98: 519.21

Определение параметров циклических космических процессов

М.М. Лычак

Институт космических исследований, Киев, Украина

e-mail: set@space.is.kiev.ua

Поступила в редакцию 25 февраля 2007 г.

1 Введение

Изменения различных космических факторов, влияющих на земные процессы, имеют циклический характер (Лычак, Василик, 2004; Василик, Лычак, 2005). Циклическость последовательности данных об изменениях космического фактора имеет место тогда, когда наблюдается некоторая повторяемость изменений значений последовательности во времени, хотя длительность конкретных циклов и величина изменений на разных циклах может значительно отличаться от некоторого среднего значения. Однако при этом существуют устойчивые интервальные оценки отклонений от среднего значения, и сохраняется некоторый качественный образ выделенного цикла изменений (Лычак, 2006а). Центральный пункт анализа такой числовой последовательности данных – оценивание информативных параметров, например, некоторого среднего периода цикла.

Кроме того, возможны “наложения” разных циклов с некратными периодами в одной и той же последовательности данных (т. е. аналог почти периодического процесса (Демидович, 1967)). Поэтому возникает задача выделения и анализа каждой циклической составляющей, с минимальным влиянием других на точность получаемых оценок.

2 Исследования тенденций изменения космических процессов путем усреднения последовательности данных “скользящим” окном

Целесообразно проводить сглаживание последовательности данных скользящими окнами с фиксированной шириной для выявления характерных тенденций их изменения (Лычак, Царук, 2006). При этом сглаженная последовательность будет характеризовать медленно изменяющуюся составляющую, а разность между исходной последовательностью и сглаженной – быстро изменяющуюся составляющую. Важную роль играет форма скользящего окна сглаживания, поэтому кроме прямоугольного окна следует использовать более сложные, но зато более точные с точки зрения аппроксимации исходных данных окна (Лычак, 2006а).

Рассмотрим числовую последовательность измеренных (или вычисленных) значений определенного космического фактора: y_n ($n = 1, 2, 3, \dots, M$), где $M > 0$ – некоторое целое (достаточно большое) число. Простейшее скользящее окно, которое используется для сглаживания, – это прямоугольное окно шириной $N_0 = 2N + 1$ ($N > 0$ – некоторое целое число), когда значения сглаженной последовательности \bar{y}_n определяются по формуле:

$$\bar{y}_n = N_0^{-1} \cdot \sum_{i=n-N}^{n+N} y_i,$$

при $n = N + 1, N + 2, \dots, M - N$, $\bar{y}_n = \bar{y}_{N+1} \forall n \leq N$, $\bar{y}_n = \bar{y}_{M-N} \forall n > M - N$.

Т. е. определяется постоянное среднее арифметическое N_0 значений, принадлежащих временному интервалу на протяжении ширины окна, покрывающего в процессе “скольжения” некоторую часть последовательности. Найденное среднее значение аппроксимирует экспериментальные данные на данном временном интервале, но это значение присваивается лишь члену сглаженной последовательности для момента времени, соответствующего средней точке окна сглаживания.

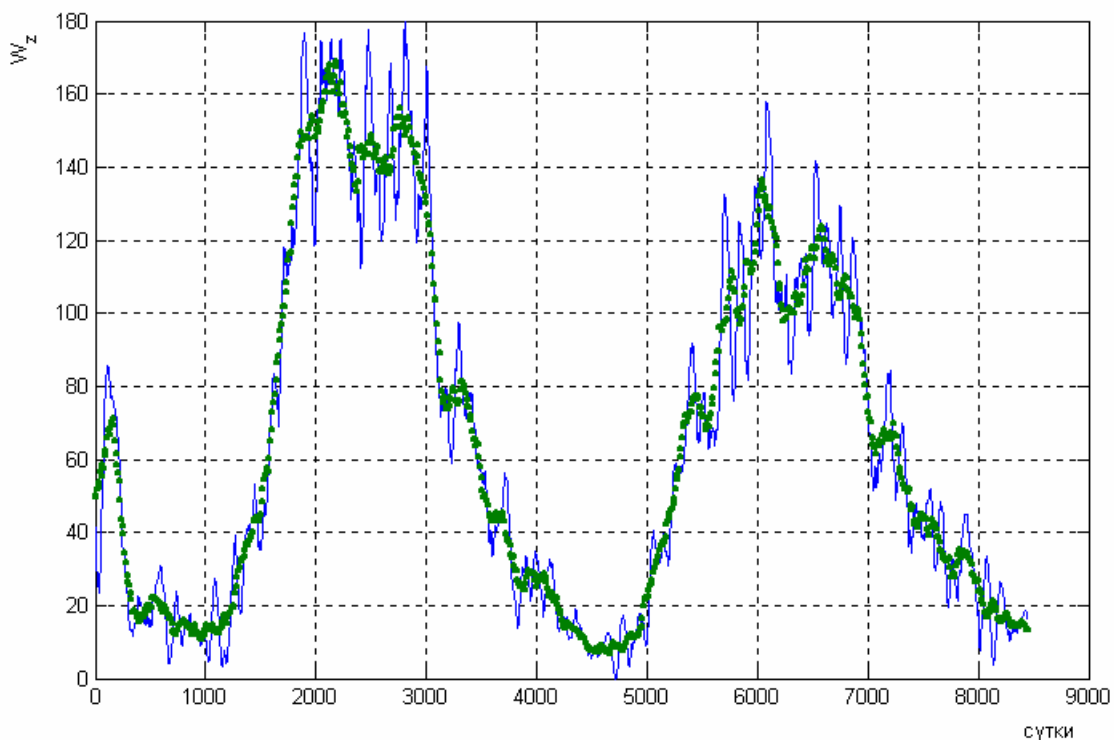


Рис. 1. Сглаженные прямоугольным (график из точек) и полиномиальным (сплошная линия) скользящими окнами среднесуточные значения чисел Вольфа с 07.11.1983 г. по 31.12.2006 г. (ширина окна – 183 дн.)

Для повышения точности аппроксимации предложено вместо некоторого постоянного значения определять полином 4-й степени с неизвестными коэффициентами, которые вычисляются из условия максимальной точности приближения (аппроксимации), а именно, минимума среднеквадратичного отклонения (Лычак, 2006а). При “скольжении” окна каждый раз неизвестные коэффициенты определяются заново по экспериментальным данным. Однако при сдвиге на один шаг “скольжения” добавляется только одна новая точка в конце окна, и отбрасывается одна точка в его начале, а потому коэффициенты изменяются незначительно. При этом обеспечивается эффект сглаживания, если количество точек на ширине окна не менее чем в два раза больше числа коэффициентов. Такое последовательное “скольжение” позволяет построить рекуррентную процедуру нахождения каждого последующего сглаженного

значения. В этом случае значения сглаженной последовательности \tilde{y}_n ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) определяются по формуле:

$$\tilde{y}_n = x_0 + x_1(n - (N + 1)) + x_2(n - (N + 1))^2 + x_3(n - (N + 1))^3 + x_4(n - (N + 1))^4,$$

где коэффициенты x_j ($j = 0, 1, 2, 3, 4$) определяются описанным в (Лычак, 2006а) образом.

Применим процедуру такого сглаживания к последовательности среднесуточных значений относительных чисел пятен (чисел Вольфа) W с 07.11.1983 г. по 31.12.2006 г. (охватывающей два последних 11-летних цикла), выбрав ширину окна равной 183 дн. То же самое сделаем с последовательностью среднесуточных значений уровня радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см F10.7 (за тот же период времени и используя ту же ширину скользящего окна). Приведенные на рисунках 1 и 2 наложенные графики показывают отличия между сглаженными значениями при применении разных окон. Применение полиномиального окна для сглаживания позволяет выделить более тонкие детали изменения исследуемых процессов по сравнению с прямоугольным окном при одинаковой его ширине.

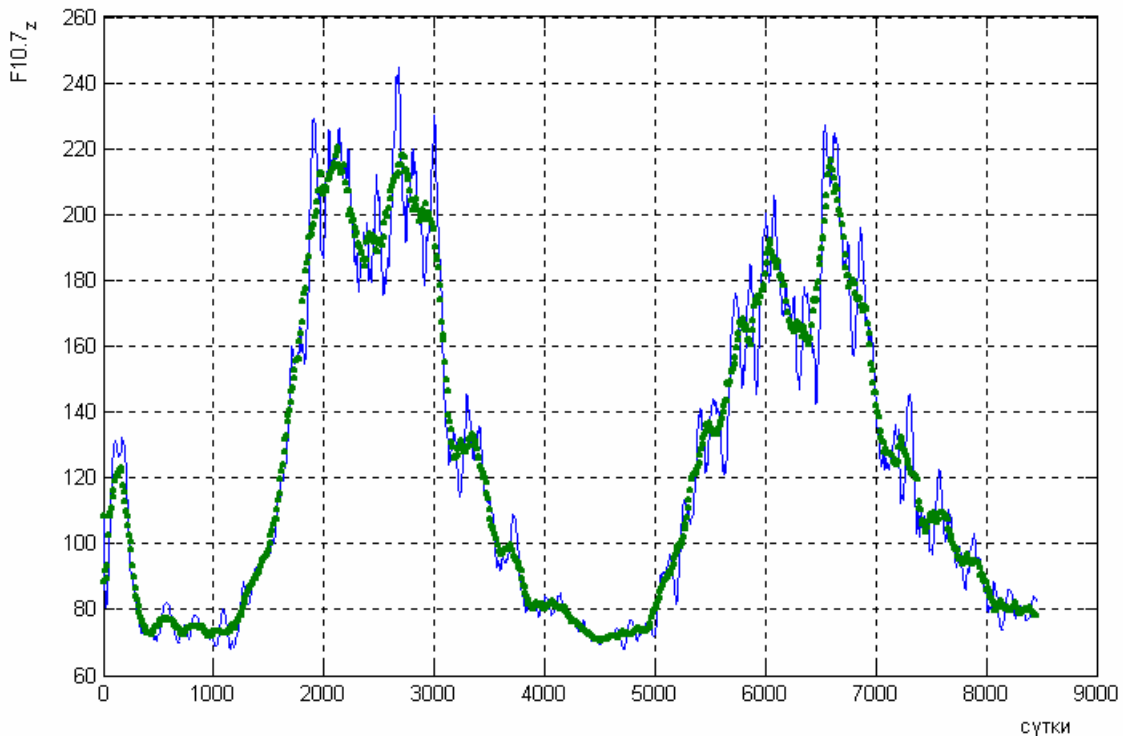


Рис. 2. Сглаженные прямоугольным (график из точек) и полиномиальным (сплошная линия) скользящими окнами среднесуточные значения уровня радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см (с 07.11.1983 г. по 31.12.2006 г.) (ширина окна – 183 дн.)

Рисунок 3 иллюстрирует результаты сглаживания полиномиальным скользящим окном среднесуточных значений уровня радиоизлучения Солнца (верхний график) и значений чисел Вольфа (нижний график) за тот же период. Оба графика показывают достаточно высокий уровень их синхронности и качественную идентичность поведения такой расчетной характеристики уровня солнечной активности, как числа Вольфа и физически измеренной –

уровня радиоизлучения Солнца, а значит, взаимосвязи этих показателей солнечной активности. Тонкая структура изменений обоих показателей практически совпадает, а коэффициент корреляции между разностями исходных и сглаженных значений этих показателей равен **0,795**.

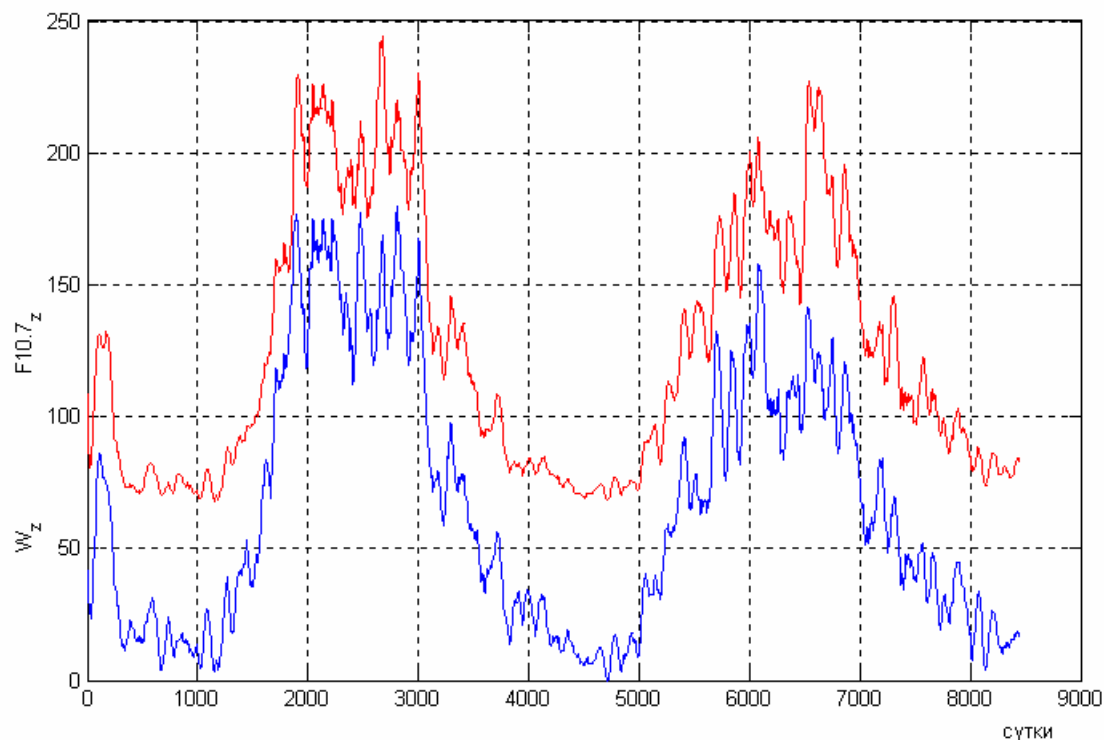


Рис. 3. Сглаженные полиномиальным скользящим окном шириной 183 дн. среднесуточные значения уровня радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см (верхний график) и аналогичные значения чисел Вольфа (нижний график) с 07.11.1983 г. по 31.12.2006 г.

Два графика на рисунке 4(А) соответствуют изменениям среднесуточной величины числа Вольфа W (сплошная линия) с 01.01.2002 г. по 31.12.2006 г. (на интервале времени, когда происходило в среднем уменьшение солнечной активности), а также усредненных скользящим полиномиальным временным окном шириной 183 дн. значениям W_z (график из точек). Два графика на рисунке 4(Б) соответствуют изменениям среднесуточного уровня потока радиоизлучения Солнца на волне длиной 10,7 см ($F_{10.7}$) (сплошная линия) с 01.01.2002 г. по 31.12.2006 г., а также изменениям усредненного таким же скользящим окном потока $F_{10.7_z}$ на том же интервале времени (точки).

Вычисленный коэффициент корреляции между разностями сглаженных и несглаженных данных обоих графиков для периода 2002–2006 гг. (как и для двух предыдущих циклов) равен **0,8**, т. е. практически не изменился. Это подтверждает стабильную связь между указанными показателями солнечной активности. Поэтому поток $F_{10.7}$ широко используется для установления закономерностей влияния солнечной активности на земные процессы, так как данный показатель может с достаточной точностью измеряться с высокой частотой дискретизации по времени.

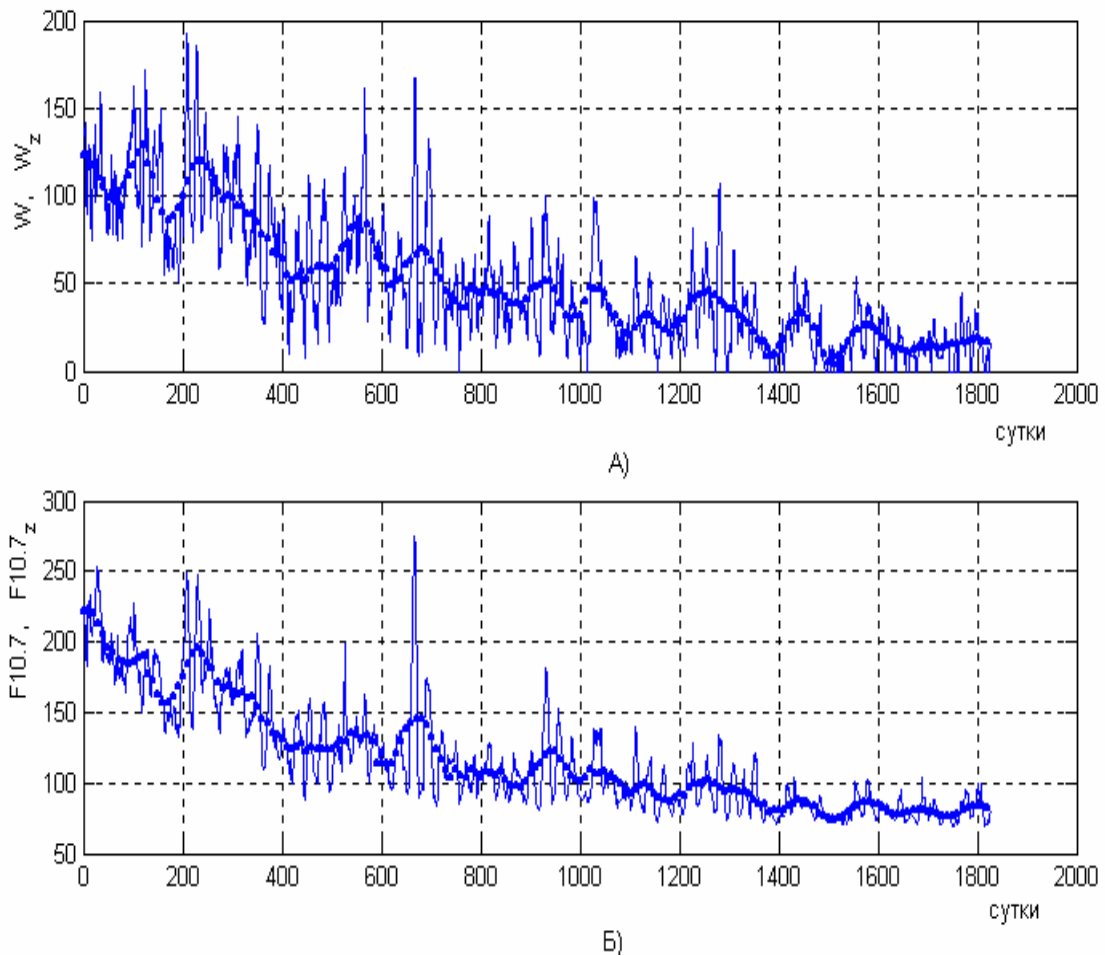


Рис. 4. Среднесуточные значения чисел Вольфа W (А – сплошная линия) и значения уровня радиопотока Солнца на волне 10,7 см $F_{10.7}$ (Б – сплошная линия) с 01.01.2002 г. по 31.12.2006 г., а также их сглаженные полиномиальным окном шириной 183 дн. значения (точки) соответственно для W_z (А) и $F_{10.7z}$ (Б)

Из рисунка 5 видно также уровень взаимосвязи чисел Вольфа с таким показателем солнечной активности, как суммарная площадь солнечных пятен в миллионных долях полусферы Солнца – S_p . Вычисленный, как и ранее, коэффициент корреляции этих двух показателей равен **0,68**. Т.е. он достаточно высок, но меньше коэффициента, характеризующего взаимосвязь между числами Вольфа и уровнем потока радиоизлучения $F_{10.7}$.

Естественно, что знание лишь суммарной площади солнечных пятен не учитывает характеристик магнитных полей этих пятен. В то же время, можно считать, что это обстоятельство частично учитывается в методике вычислений чисел Вольфа. Действительно, к количеству пятен добавляют умноженное на десять количество групп таких пятен, а появление групп говорит о повышенном уровне магнитных взаимосвязей между пятнами внутри группы.

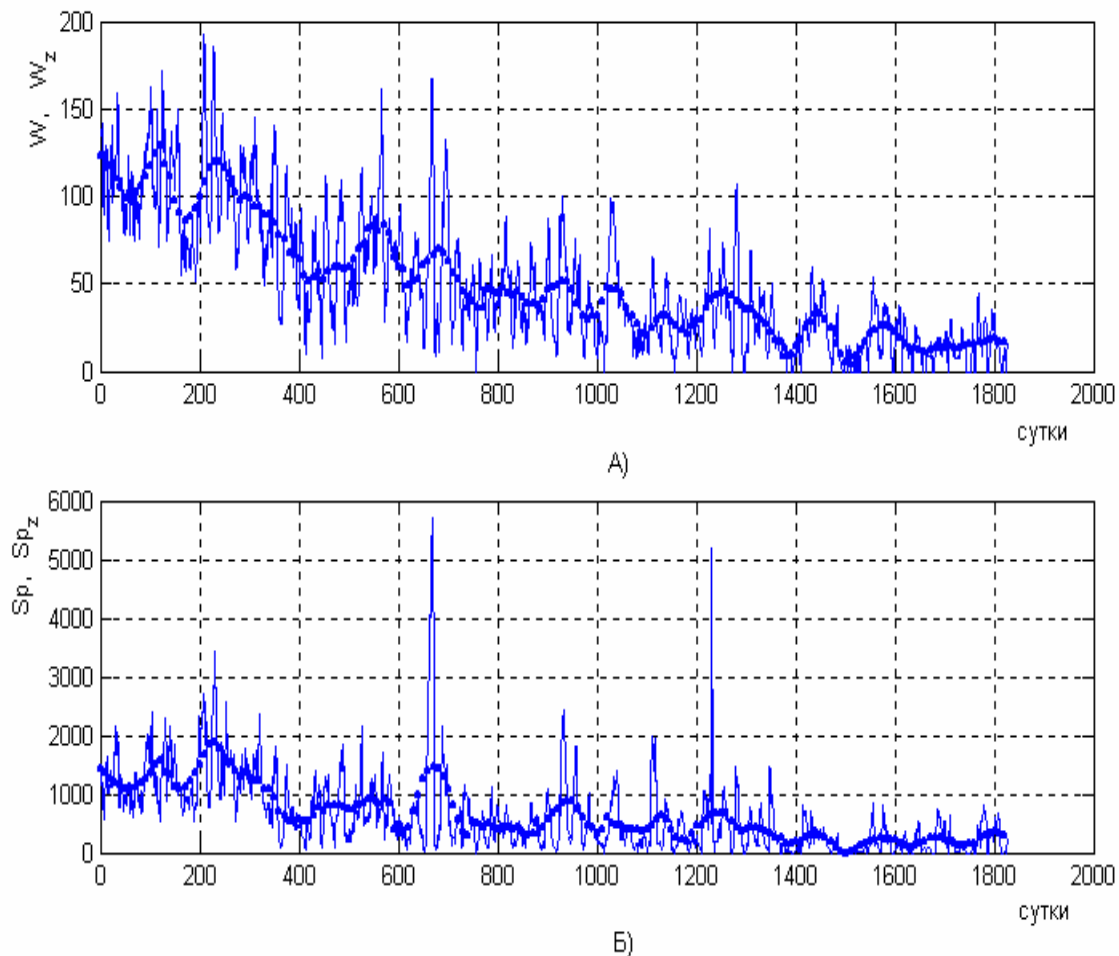


Рис. 5. Среднесуточные значения чисел Вольфа W (А – сплошная линия) и значения суммарной площади солнечных пятен в миллионных частях полусферы Солнца – Sp (Б – сплошная линия) с 01.01.2002 г. по 31.12.2006 г., а также их сглаженные полиномиальным окном шириной 183 дн. значения (графики из точек соответственно для W_z (А) и Sp_z (Б))

На рисунке 6 приведены графики другого показателя, характеризующего солнечную активность. Это график (сплошная линия) среднесуточных значений уровня фонового потока мягкого рентгена в диапазоне 1–8 А – X_{bcg} , порождаемого вспышками на Солнце и служащего оценкой их мощности, а также сглаженных полиномиальным окном шириной 183 дн. значений X_{bcg_z} (график из точек) с 01.04.2003 г. по 31.12.2006 г.

Для сравнения и установления взаимосвязи между X_{bcg} и $F_{10.7}$ на рисунке 7 приведены графики их сглаженных среднесуточных значений X_{bcg_z} и $F_{10.7_z}$. Вычисленный, как и ранее, коэффициент корреляции этих двух показателей равен **0,69**.

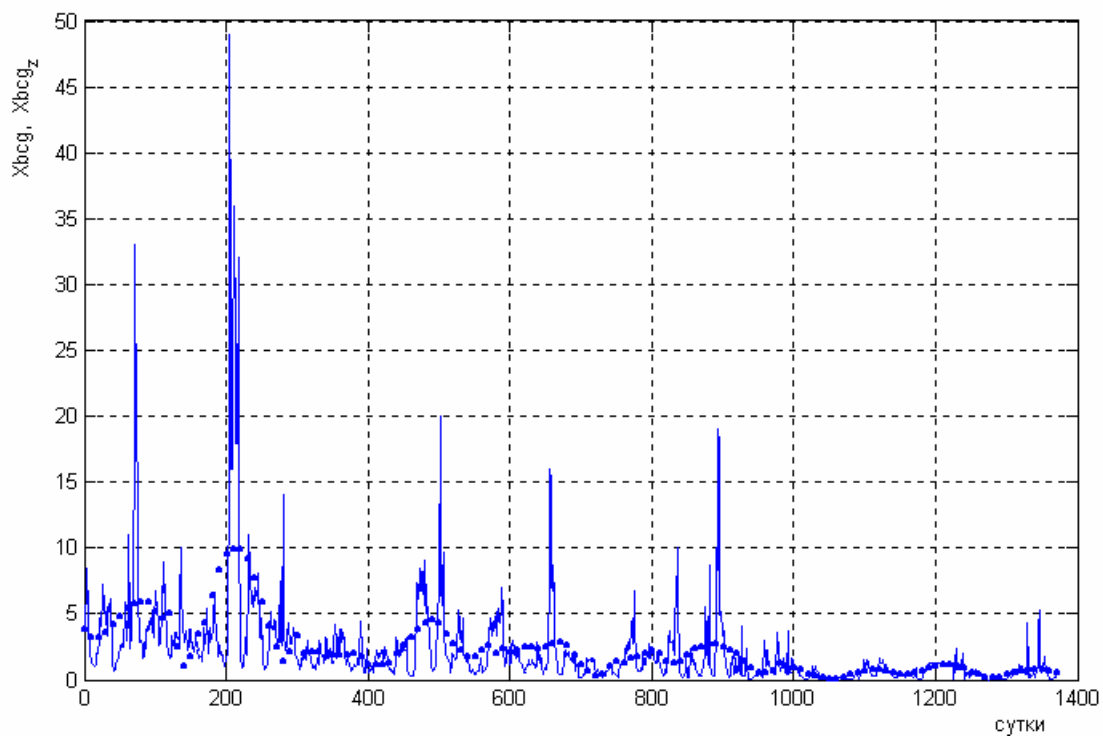


Рис. 6. Среднесуточные значения уровня фонового потока мягкого рентгена (X_{bcg}) (сплошная линия) и сглаженные полиномиальным окном шириной 183 дн. значения X_{bcgz} (график из точек) (с 01.04.2003 г. по 31.12.2006 г.)

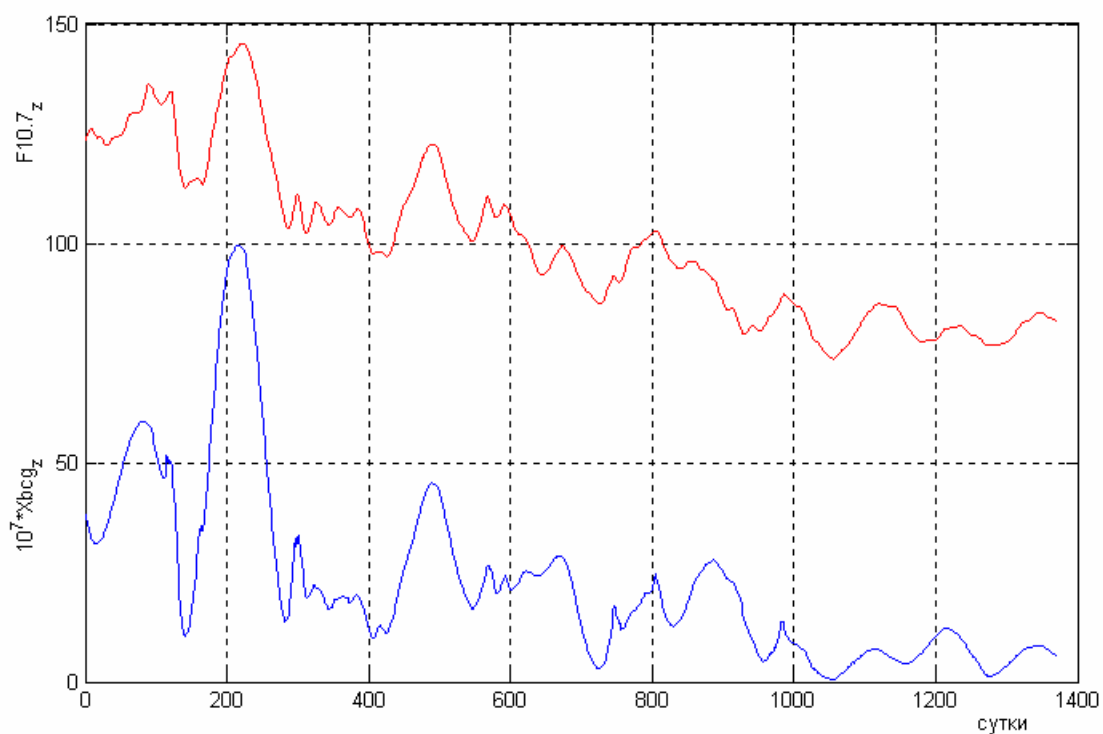


Рис. 7. Изменения сглаженных полиномиальным окном шириной 183 дн. среднесуточных значений $10^7 * X_{bcgz}$ (нижняя линия) и $F10.7z$ (верхняя линия) с 01.04.2003 г. по 31.12.2006 г.

3 О глобальном повышении уровня солнечной активности и глобальном потеплении климата на Земле

На рис. 8 приведен график среднегодовых значений наблюдаемых относительных чисел солнечных пятен – чисел Вольфа W за все время, когда этот индекс регулярно вычисляли, т. е. с 1700 г. по 2006 г., а также значения этого индекса, сглаженные прямоугольным окном шириной 33 г. На графике среднегодовых значений чисел Вольфа четко выделяются 11-летние (стандартные) циклы. График для сглаженных значений (плавно изменяющаяся кривая) выделяет известные вековые циклы (три “волны”).

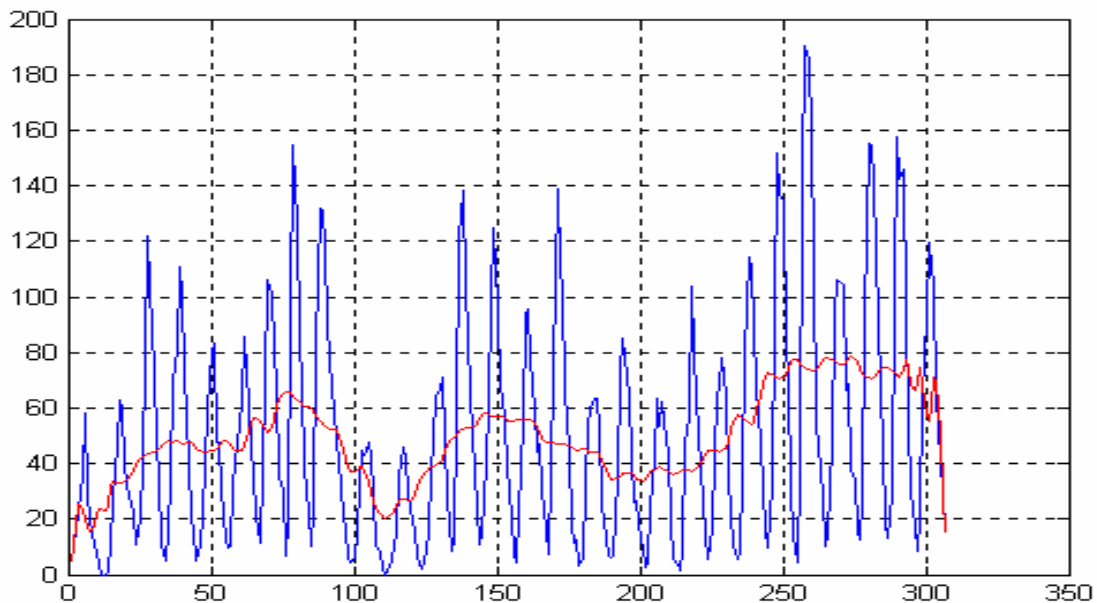


Рис. 8. График среднегодовых значений чисел Вольфа W (относительно быстро изменяющихся), а также сглаженные прямоугольным окном шириной 33 г. значения (более плавно изменяющиеся) с 1700 г. по 2006 г.

В Таблице 1 приведены данные о трех вековых циклах, каждый из которых формируется фактически из девяти более коротких 11-летних циклов. За начало каждого векового цикла берется момент глобального минимума среди первых минимумов 11-летних циклов. Последний вековой цикл практически завершен, так как почти завершен последний (девятый по счету) 11-летний цикл, который в него входит.

Анализ данных о вековых циклах указывает на достаточно резкое повышение солнечной активности во время последнего третьего цикла по сравнению с первыми двумя. А именно, среднее значение числа Вольфа для него почти на 50 % выше, чем в предыдущие циклы. Аналогично можно сказать и о максимальной величине усредненных среднегодовых значений в цикле. Известно, что усредненное значение уровня излучения Солнца в оптическом диапазоне положительно коррелирует с уровнем солнечной активности. Выше было показано, что это справедливо и для уровня излучения Солнца в других диапазонах. А значит, на протяжении последнего векового цикла уровень энергетического потока от Солнца к Земле был существенно выше, чем в предыдущих циклах. Возможно, основной вклад в эффект потепления на поверхности Земли, который наблюдается на протяжении последних десяти-

летий, дает повышение потока энергии от Солнца, а не явления, обусловленные антропогенным фактором (хотя, возможно, он этим потоком усиливается) (Лычак, Царук, 2006).

Таблица 1. Результаты обработки данных среднегодовых значений чисел Вольфа с 1700 г. по 2006 г.

Номер векового цикла	1	2	3
Дата начала векового цикла (год)	1712	1810	1913
Начало векового цикла (точка)	13	111	214
Ширина векового цикла (в годах)	98	103	93
Максимум среднегодового числа Вольфа W на протяжении цикла	154.4	139	190.2
Дата максимума W (год)	1778	1870	1957
Среднее число Вольфа на цикле	46.72	42.36	66.02
Максимум сглаженного значения W на протяжении цикла	66.07	57.97	78.82
Максимум ΔW	72.7	65	103.7
Дата максимума ΔW (год)	1777	1870	1956

4 Определение средних периодов циклических составляющих космических процессов

В (Лычак, 2006а) была предложена методика выделения периодической составляющей “зашумленного” процесса. Она может быть распространена на циклические составляющие измеряемого процесса, которые нельзя представить в виде суммы периодической составляющей и случайного стационарного шума, но которые имеют аналогичные свойства.

Для вычисления среднего периода циклическости следует:

1. При анализе числовой последовательности, которая содержит циклическую составляющую, для определения среднего периода этой составляющей обрабатывать часть данных на такой максимальной длине интервала, при которой она кратна предполагаемому периоду;
2. Длина интервала дискретности по времени числовых данных должна быть кратной с достаточной степенью точности определяемому периоду цикла;
3. Для более точного оценивания информативных параметров циклического процесса следует вначале осуществить разделение быстрых и медленных составляющих этого процесса путем сглаживания соответствующей числовой последовательности скользящим временным окном выбираемой ширины.
4. Для исследуемой последовательности z_n ($n = 1, 2, \dots$) вычисляют процесс

$$y_n(\tilde{T}) = \frac{1}{\tilde{N}} \cdot \sum_{j=0}^{\tilde{N}} z_{n+j\tilde{T}},$$

где $\tilde{N} > 0$ – некоторое целое число, определяющее количество суммируемых отрезков исходного процесса длиной $\tilde{T} > 0$.

5. Определяются оценки $y_{\min}(\tilde{T}) = \min_{n \in [1, \tilde{T}]} \{y_n(\tilde{T})\}$ и $y_{\max}(\tilde{T}) = \max_{n \in [1, \tilde{T}]} \{y_n(\tilde{T})\}$. При наличии в последовательности циклических составляющих имеет место так называемая резонансная зависимость оценок от \tilde{T} .
6. По графику наиболее резко выраженной резонансной зависимости определяются значения \tilde{T} в точке каждого значимого резонанса, которые и задают с точностью до ширины резонанса среднее значение периода соответствующей циклической составляющей.

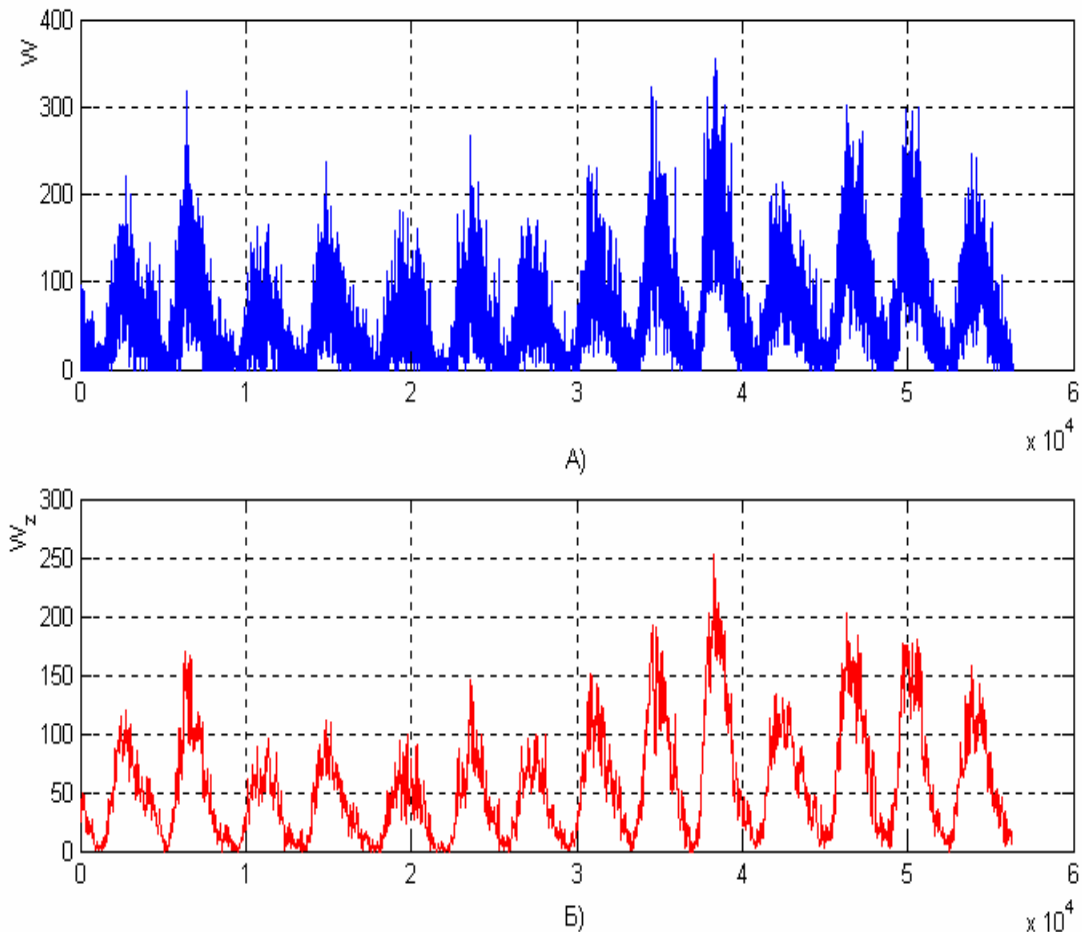


Рис. 9. Среднесуточные значения числа Вольфа – Wdaily (А) и сглаженные полиномиальным окном шириной 183 дн. – Wdailyz (Б) с 01.01.1853 г. по 31.12.2006 г.

На рисунке 9 приведены графики изменения текущих и сглаженных полиномиальным окном шириной 183 дн. среднесуточных значений чисел Вольфа, которые характеризуют солнечную активность за период с 01.01.1853 г. по 31.12.2006 г. (четырнадцать 11-летних циклов). Для этих изменений характерна вариабельность не только периода цикличности, но и их величины в каждом отдельном цикле (можно говорить о некоторой модуляции амплитуды циклов). На графике сглаженных значений видна тонкая структура изменений на протяжении каждого стандартного цикла и то, что за последние семь циклов солнечная активность была значительно выше, чем за предыдущие. Среднее значение чисел Вольфа за последние семь циклов равно 72,5, а за предыдущие – 41,5, то есть солнечная активность повысилась в 1,7 раза за последние 72 г., что, возможно, является главной причиной глобального потепления климата на Земле.

Для анализа циклических составляющих солнечной активности была выбрана резонансная зависимость $y_{\max}(\tilde{T}) = \max_{n \in [1, \tilde{T}]} \{y_n(\tilde{T})\}$ (рисунок 10).



Рис. 10. Графики “резонансов” для анализа периодичности ежедневных сглаженных значений чисел Вольфа (полиномиальным окном шириной 183 сут.) за период с 09.10.1855 г. по 31.03.2007 г. на интервале возможных периодов

На рисунке 10 приведен график “резонансов” для анализа периодичности ежедневных сглаженных значений чисел Вольфа за время с 09.10.1855 г. по 31.03.2007 г. на интервале возможных значений периодов от 2 700 дн. до 9 700 дн. Здесь “резонансы” проявляются более размыто, чем в случае явной периодической составляющей. Однако из анализа полученных данных следует, что искомый период первого известного цикла равен около 3 868 дн. Отсюда следует, что оптимальный средний период циклов солнечной активности, вычисленный по числам Вольфа, равен около 10,6 г. Также отчетливо выражен и цикл Хейла (двойной цикл) длительностью около 8 066 дн., т. е. около 22,1 г.

На графике резонансов на рисунке 10 вначале выделяется небольшой, но четкий резонанс, который дает приближенное значение среднего периода этой циклической составляющей процесса солнечной активности 2 932 дн., т. е. около 8,03 г.

Отметим, что данной составляющей соответствует, как и в случае цикла Хейла, составляющая с приближенно двойным периодом, что представлена резонансом для значения 5 908 дн., т. е. около 16,19 г. Учитывая интервальность такой характеристики циклического процесса (Лычак, 2004; Лычак, 2006в), как его период, можно считать, что это отображение наличия базовой циклической составляющей с периодом около 8,03 г., которая проявляется на кратных периодах.

Следующий “резонанс” указывает на еще одну циклическую составляющую со средним периодом 3 166 дн., т. е. около 8,67 г. Ее наличие подтверждается резким резонансом при

значении среднего периода 6 329 дн., т. е. около 17,34 г., а это практически точно ($3\,166 \times 2 = 6\,332$) соответствует двойному периоду. Этот факт подтверждает наличие еще одной базовой циклической составляющей с периодом около 8,67 г., которая проявляется в кратных периодах.

Далее следует резонанс, который соответствует приближенному значению среднего периода 3 614 дн., т. е. около 9,9 г. Ему соответствует как двойной средний период 7 191 дн. ($3\,614 \times 2 = 7\,228$), т. е. около 19,7 г., которому соответствует четко проявленный резонанс на графике. Это подтверждает наличие базовой циклической составляющей с периодом около 9,9 г., которая проявляется в кратных периодах.

На графике достаточно выражен резонанс, который соответствует приближенному значению среднего периода 4 417 дн., т. е. около 12,1 г. Наличие такой базовой циклической составляющей подтверждается проявлением двойного периода в 8 834 дн. ($4\,417 \times 2 = 8\,834$), т. е. около 24,52 г. на графике.

Значительно слабее проявлен резонанс, который соответствует приближенному значению среднего периода 4 624 дн., т. е. около 12,67 г. Но наличие такой базовой циклической составляющей подтверждается проявлением в приблизительно двойном периоде 9 295 дн. ($4\,624 \times 2 = 9\,248$), т. е. около 25,47 г., причем значительно более четко проявленного на графике.

Литература

- Василик П.В., Лычак М.М. // Проблемы управления и информатики. 2005. №. 6. С. 48.
Демидович Б.П. // Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука. 1967. С. 472.
Лычак М.М., Василик П.В. // Киберн. и вычислит. техника. 2004. Вып. 144. С. 43.
Лычак М.М. // Проблемы управления и информатики. 2006а. №. 1–2. С. 248.
Лычак М.М. // Збірник наукових праць “Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації” (за матеріалами міжнародної науково-методичної конференції). Київ. Кам’янець-Подільський. 2006б. С. 25.
Лычак М.М., Царук Н.П. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. 2006. №. 6. С. 119.
Лычак М.М. // Кибернетика и системный анализ. 2004. №. 5. С. 58.
Лычак М.М. // Труды Всероссийского (с международным участием) совещания по интервальному анализу и его приложениям. Санкт-Петербург. 2006в. С. 78.