

4. *Bieber J.W., Wanner W., Matthaеus W.H.* Dominant two-dimensional solar wind turbulence with implication for cosmic ray transport. // *J. Geophys. Res.*, V.101 No A2, P. 2511–2522, 1996.

5. *Matthaеus W.H., Goldstein M.L., Roberts D.A.* Evidence for the presence of quasi-two-dimensional nearly incompressible fluctuations in the solar wind. // *J. Geophys. Res.* V. 95 P. 20,673–20,683, 1990

6. *Tu C.-Y., Marsch E.* MHD structures, waves, and turbulence in solar wind: observations and theories. // *Space Sci. Rev.*, V. 73. P. 1-210. 1995.

7. ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/

УДК 523.98

*А.П. Крамынин, А.В. Мордвинов**

О МОДУЛЯЦИИ АМПЛИТУДЫ ВЕКОВЫХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

По данным реконструкции чисел пятен S_n за 11400 лет методом комплексной демодуляции исследованы долговременные вариации амплитуды и продолжительности вековых циклов* солнечной активности в окрестностях периода 100 лет.

Установлено, что у вековых циклов временами изменяется продолжительность, амплитуда и фаза. В эти моменты наблюдаются фазовые «скачки», которые совпадают по времени с минимумами огибающей вековых циклов. Модулирующие вековой цикл квазипериодичности совпадают с квазипериодичностями, наблюдаемыми в спектре ряда S_n , кроме одной 1550 лет, которая в спектре S_n слабо выражена. В минимуме 6150-летнего цикла амплитуда огибающей вековых циклов также минимальна. По продолжительности можно выделить два предпочтительных вида вековых циклов: около 88 и 100 лет. Возможно, также имеются и предпочтительные значения продолжительности 11-летних циклов: это 10.5, 11.1, 12.2 и 14.8 лет, что вписывается в диапазон изменений наблюдаемых значений продолжительности 11-летних циклов.

Временные изменения солнечной активности носят многомасштабный, иерархический характер. Прямые данные о солнечной активности выявили наличие 11-летних циклов, продолжительность которых варьирует от 8 до 14 лет, а амплитуда модулируется вековым циклом [2]. Использование рядов чисел пятен, реконструированных на основе содержания космогенных изотопов ^{14}C и ^{10}Be , значительно расширяет наши знания о временных вариациях солнечной активности. В спектре наиболее длинного (11400 лет) реконструированного ряда чисел пятен S_n [4] с временным разрешением 10 лет хорошо выявляются следующие квазипериодичности (рис. 1): вековой цикл, продолжительность которого варьирует в диапазоне от 80 до 100 лет с наиболее вероятными значениями 88 и 97 лет, пики

* Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

222 и 208 лет, соответствующие циклу Зюсса, пики 360 и 523 года, близкие к тем, что были найдены в [5], пик 2360 лет сразу после его открытия был назван как солнечно-климатическим [12]. Достаточно хорошо определяются квазипериодичности 960 и 6150 лет, последний пик выделяется на спектре благодаря его большой амплитуде (см. рис. 2).

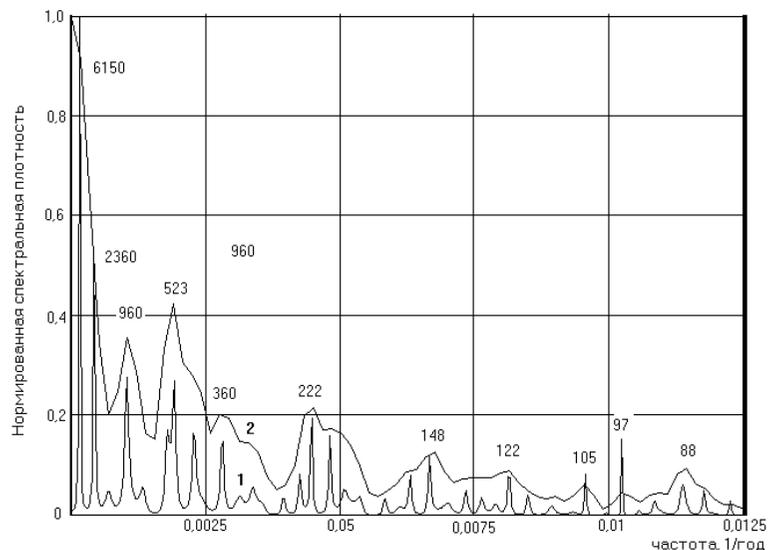


Рис. 1. Нормированные спектры ряда S_n , рассчитанные методом максимальной энтропии (кривая 1) и преобразование Фурье со сглаживающим окном Тьюки (кривая 2)

Роль всех этих циклов в наступлении глобальных минимумов солнечной активности была исследована в [3], где дан количественный критерий для идентификации эпох великих минимумов солнечной активности. Особо следует прокомментировать серию пиков 105, 111, 122, 148 лет. Это могут быть самостоятельные квазипериодичности, но в любом случае в них будет присутствовать вклад гармоник, связанных с наложением частоты дискретизации 0.1 год^{-1} и частот, связанных с продолжительностью 11-летних цикла и больших, чем интервал дискретизации. Если бы появление этих пи-

ков было связано только с наложением частот, то мы могли бы говорить о предпочтительных значениях продолжительности 11-летних циклов. Это были бы циклы продолжительностью 10.5, 11.1, 12.2 и 14.8 лет, что совпадает с диапазоном наблюдаемых значений продолжительности 11-летних циклов.

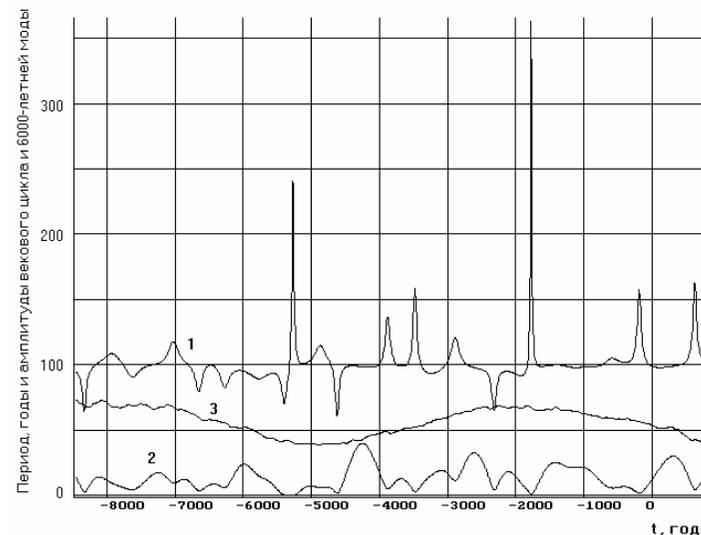


Рис. 2. Продолжительность (кривая 1) и амплитуда (кривая 2) векового цикла. Кривая 3 – 6150-летняя гармоника, выделенная скользящим средним. Опорный период 100 лет

Обсуждаемые выше спектральные методы дают усредненные характеристики за исследуемый период и применимы, в общем-то, к стационарным рядам. А, строго говоря, ряд чисел Вольфа является нестационарным рядом. Т.е. продолжительность наблюдаемых циклов их амплитуда изменяются во времени. Если процесс отличен от нуля в сравнительно узкой полосе частот, то для его исследования применим гильбертовский подход, частной реализацией которого является метод комплексной демодуляции. С его помощью можно представить процесс $S_n(t)$ одним колебанием с переменной амплитудой $A(t)$ и обобщенной фазой $\Phi(t)$ в виде:

$$S_n(t) = A(t)\cos\Phi(t),$$

что позволяет изучить характер изменения амплитуды и фазы гармоник в окрестностях некоторой опорной частоты. Значение периода исследуемой гармоники $T(t)$ можно определить как обратную величину от производной обобщенной фазы.

Применение метода комплексной демодуляции к реконструированному ряду чисел пятен S_n (рис. 2) позволяет исследовать динамику изменения амплитуды по огибающей $A(t)$ (кривая 2) и продолжительности вековых циклов $T(t)$, найденная по первой производной обобщенной фазы $d\Phi(t)/dt$ (кривая 1). На кривой продолжительности вековых циклов наблюдаются резкие скачки, которые происходят, когда амплитуда $A(t)$ мала. Эти скачки связаны с резкими изменениями фазы и происходят, когда изменяются характеристики векового цикла.

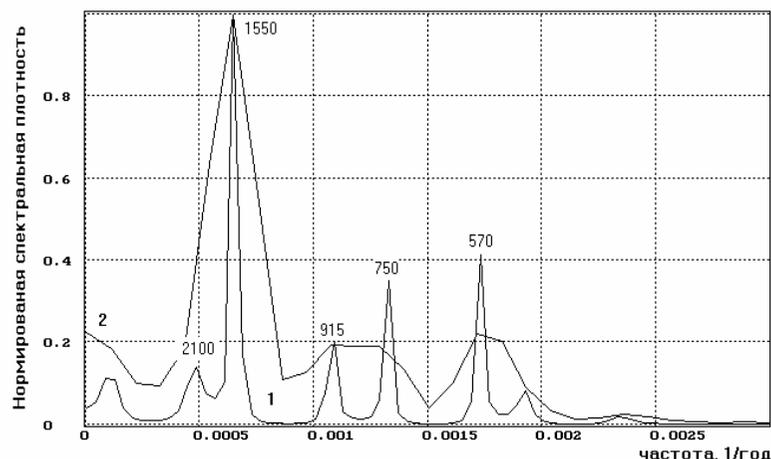


Рис. 3. Нормированные спектры ряда $A(t)$, рассчитанные методом максимальной энтропии (кривая 1), преобразование Фурье со сглаживающим окном Гьюки (кривая 2)

Спектр огибающей вековых циклов $A(t)$ рис. 3 показывает, что вековые циклы модулированы квазипериодичностями: ≈ 6200 , ≈ 2100 , ≈ 1550 (наиболее выдающийся пик), ≈ 915 , ≈ 750 (возможно вторая гармоника 1550-летнего цикла) и ≈ 570 лет. Периодичности

менее 500 лет в спектре наблюдаться не могут, так как частота обрезания используемого низкочастотного фильтра составляет $0,002 \text{ год}^{-1}$. Наблюдаемые на рис. 3 модулирующие периодичности более менее совпадают с квазипериодичностями на рис. 1, кроме одной - 1550 лет, которая на рис. 1 слабо выражена.

Итак, применение метода комплексной демодуляции к реконструированному ряду чисел пятен S_n показывают, что у вековых циклов временами меняется продолжительность, амплитуда и фаза. В эти моменты наблюдаются фазовые «скачки», которые совпадают по времени с минимумами огибающей вековых циклов. Модулирующие вековой цикл квазипериодичности совпадают с квазипериодичностями, наблюдаемыми в спектре числа пятен S_n , кроме одной - 1550 лет, которая в спектре S_n слабо выражена. В минимум 6150-летнего цикла амплитуда огибающей вековых циклов также минимальна. По продолжительности можно выделить два предпочтительных вида вековых циклов, около 88 и 100 лет. Возможно, также имеются и предпочтительные значения продолжительности 11-летних циклов: это 10.5, 11.1, 12.2 и 14.8 лет, что вписывается в диапазон наблюдаемых значений продолжительности 11-летних циклов.

Для объяснения такого поведения векового цикла подходит такая динамическая система, которая спонтанно скачком переключается на другой режим, а затем возвращается обратно [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кичатинов Л.Л., Олемский С.В. Модель перемежаемости глобальных минимумов и максимумов в солнечном динамо // Солнечн-земная физика. 2010. Вып. 5. С. 3–8.
2. Чистяков В.Ф. Солнечные циклы и колебания климата. Владивосток: Труды УАФО, Дальнаука, 1997. 156 с.
3. Mordvinov A.V., Kramynin A.P. Long-Term changes in sunspot activity, occurrence of grand minima, and their future tendencies // Solar physics. 2010. V. 264. P. 269–278.
4. Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schussler M., Beer J. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 year // Nature. 2004. V. 431, N 7012. P. 1084–1087.
5. Usoskin I.G., Solanki S.K., Mursula K., Schussler M., Alanko K. Reconstruction of solar activity for the last millennium using ^{10}Be data // Astronomy and Astrophysics, 2004. V. 413, P. 745.