

МОДЕЛЬ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Птицына Н.Г., Демина И.М.

Санкт-Петербургский Филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

FREQUENCY MODULATION MODEL OF THE 11-YEAR SOLAR ACTIVITY CYCLE

Ptitsyna N.G., Demina I.M.

SPbFIZMIRAN, St. Petersburg, Russia

With the help of wavelet analysis, a study of variations in the length of the solar cycle and their characteristic features in 1700–2020 was carried out. It was found that in different eras the dominant contribution is made by three distinguished branches of the Gleissberg cycle: before 1850, the 60-year branch, and after the 115-year branch. The classic 88-year branch stands out against the background of the other two branches in 1790–1910. The Dalton minimum near 1800 is characterized by a sharp increase in the length of the cycle against the background of a decrease in amplitude, as well as the fact that all three branches of the Gleissberg cycle are practically symphasic, and their amplitude modules are close to the maximum. A model is constructed in which the period of 11-year harmonic oscillation is modulated by three branches of the Gleissberg cycle. It is obtained that such a model can describe the general evolution of the spectrum and its main features, in particular, the Dalton minimum.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-229-232

Введение

В спектре солнечной активности (СА) доминирует 11-летний цикл Швабе, который называется солнечным циклом. В качестве численного индекса СА обычно используется число солнечных пятен *SN*. В СА существуют и другие вариации с разными периодами [1]. Наиболее исследована периодичность, известная как вековой цикл Глейсберга. В разные эпохи цикл Глейсберга состоит из двух или трех ветвей, периоды которых лежат в диапазоне 60÷140 лет [1, 2]. Амплитуда *A* и длина *T* солнечного цикла меняются с течением времени. Ранее было найдено, что изменение амплитуды модулируется циклом Глейсберга (период ~80 лет) [3]. Изменения длины солнечного цикла исследовались мало. Цель нашей работы состоит в исследовании вейвлет методом изменений длины 11-летнего цикла в связи с различными ветвями цикла Глейсберга и последующем их моделировании.

1. Изменение солнечной активности за последние 320 лет во временной и спектральной областях

На рис. 1 представлены временной ряд числа солнечных пятен SN и его вейвлет-спектр. Локальные максимумы отмечены символами, размер которых пропорционален значению амплитуды в максимуме. Видно наличие 11-летнего цикла и 3-х мод цикла Глейсберга. 110–120 летняя ветвь есть на всем рассматриваемом временном интервале, 60-летняя ветвь видна до ~ 1870 г., а 88-летняя ветвь условно выявляется в 1750–1910 гг. Кроме того, четко видна характерная особенность в 1790–1830 гг. (минимум Дальтона): для солнечного цикла заметно резкое увеличение периода на фоне уменьшения амплитуды. Во время минимума Дальтона разность фаз между тремя ветвями цикла Глейсберга минимальна, а модуль их амплитуд близок к максимуму.

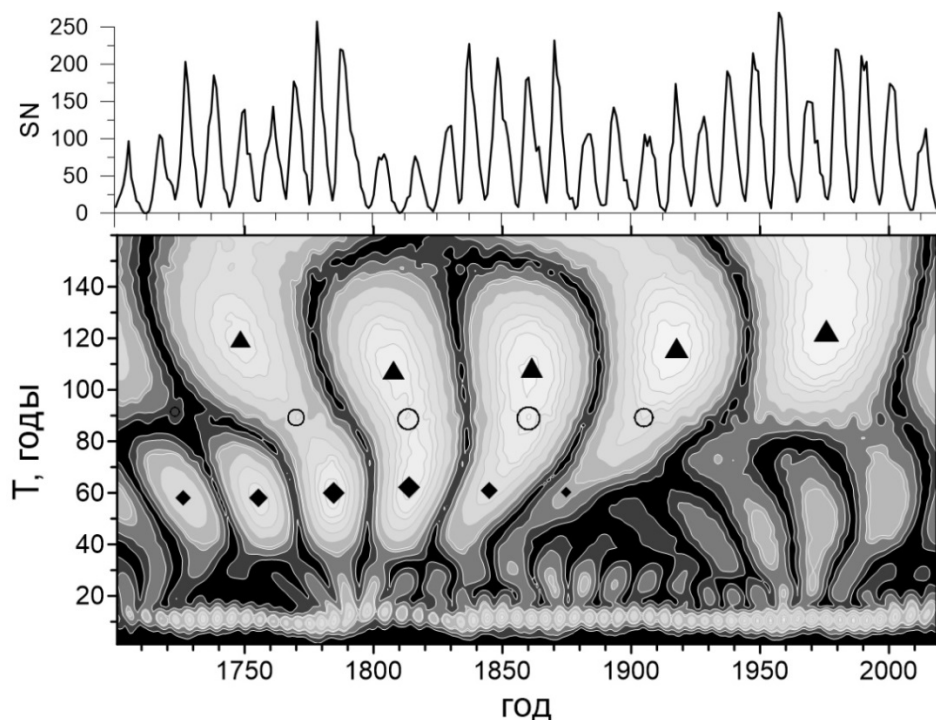


Рис. 1.

2. Связь периода T и амплитуды A 11-летней составляющей

На рис. 2 показаны изменения A (пунктирная линия) и T (сплошная линия) в 1700–2000 гг. Видно, что A и T , в целом находятся в обратной зависимости (коэффициент корреляции $k < 0$). Противофаза видна в ~ 1800 г. (минимум Дальтона) и в минимуме ~ 1910 г. В остальные периоды наблюдается изменяющийся во времени сдвиг по фазе кривых A и T , иногда наблюдается $k > 0$. Далее для отрезков кривой изменения периода длиной 60 лет вычислялся скользящий коэффициент корреляции со всеми отрезками кривой изменения амплитуды той же длины. Результаты показаны на рис. 3. Центральная темная диагональная полоса свидетельствует об анти-

корреляции A и T , что согласуется с рис. 2. Нижняя белая диагональная линия показывает изменения связи между A и T для одного и того же цикла ($k = -0.2 \div -0.7$), а верхняя – при сдвиге на 11 лет ($k = -0.7 \div -1$). При временных сдвигах между A и T видны участки, где $k > 0$ (темные) или $k < 0$ (светлые): обнаруживается квазипериодичность k с периодом 90–110 лет.

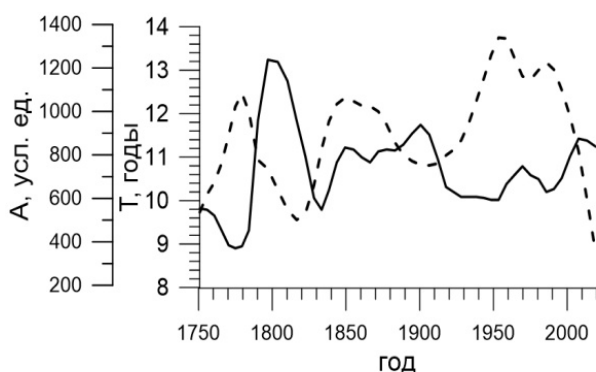


Рис. 2.

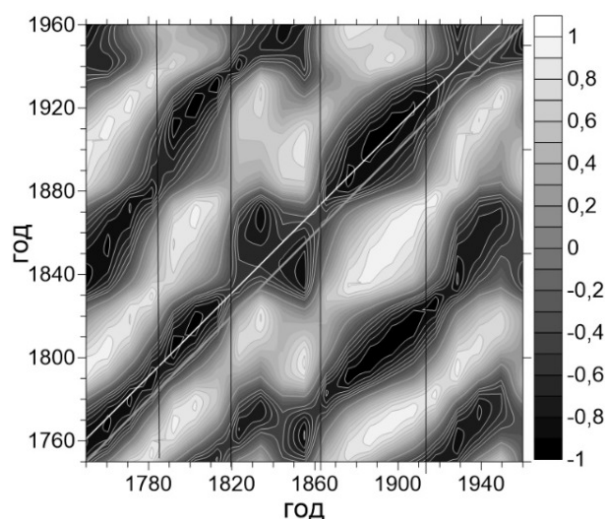


Рис. 3.

3. Модель модуляции 11-летней составляющей 3 ветвями цикла Глейсберга

Построена модель, в которой 11-летнее гармоническое колебание модулируется по частоте 60-, 88- и 115-летними ветвями цикла Глейсберга:

$$(t) = A_1 \sin(\omega t + K_1 \cos \omega_1 t + \varphi_1 + K_2 \cos \omega_2 t + \varphi_2 + K_3 \cos \omega_3 t + \varphi_3 + \varphi),$$

где ω , ω_1 , ω_2 , ω_3 – частоты основного и модулирующих колебаний; φ , φ_1 , φ_2 , φ_3 – соответствующие фазы; K_1 , K_2 , K_3 – коэффициенты частотного отклонения каждого из модуляторов. Далее вычислен вейвлет-спектр модели (рис. 4, левая панель) и проведено сравнение с вейвлет-спектром наблюдательного ряда данных SN (рис. 4, правая панель). Символами показаны максимумы спектра SN , размер символов пропорционален амплитуде. Видны особенности спектра наблюдательного ряда: в 1800 г. (минимум Дальтона) резкое увеличение периода и уменьшение амплитуды, дополнительные спектральные составляющие, а также рост периода и уменьшение амплитуды в ~1910 и 1970 гг. Модель не может передать весь спектр, поскольку затрагивает только изменение 11-летней составляющей, однако особенности спектра экспериментальных SN , в том числе, характерная особенность в минимуме Дальтона, отчетливо присутствуют в спектре модели.

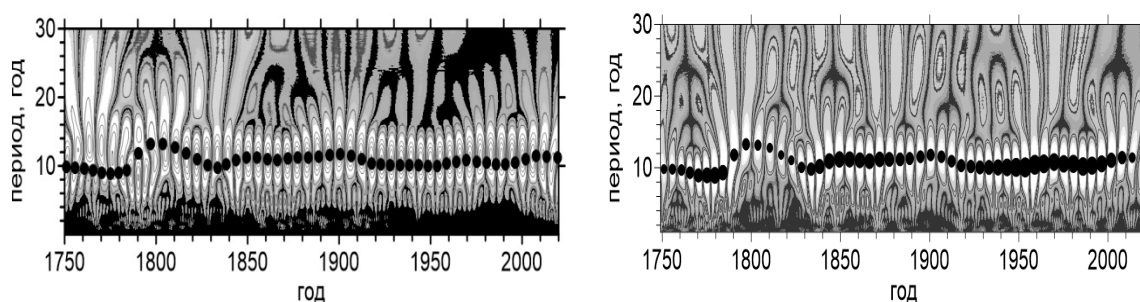


Рис. 4.

4. Выводы

- Кроме стабильной 11-летней составляющей, в спектре SN прослеживаются две мощные составляющие цикла Глейсберга (~60 и ~115 лет). До 1850 г. доминирует мода с периодом ~60 лет, потом ~115 лет. На фоне этих ветвей классическая ветвь с периодом 88 лет выделяется условно в 1750–1910 гг.

- В минимуме Дальтона все три ветви цикла Глейсберга практически симфазны, а их амплитуды по модулю близки к максимальным.

- В целом, A и T 11-летнего цикла находятся в обратной зависимости. Однако при сдвигах в десятки лет между ними видна прямая корреляция. В результате наблюдается квазипериодическая структура коэффициента корреляции k с периодом 90–110 лет.

- Построена модель 11-летнего гармонического колебания, которое модулируется по частоте 60–88- и 115-летними ветвями цикла Глейсберга с изменяющимися во времени параметрами модуляции. Результаты сравнения вейвлет-спектров модели и наблюдательного ряда подтвердили, что вариации длины солнечного цикла могут быть описаны в рамках процесса частотной модуляции тремя ветвями цикла Глейсберга.

- Частотная модуляция длины 11-летнего цикла может быть обусловлена как внутренними причинами, связанными со сложным процессом генерации магнитного поля, так и внешними внесолнечными причинами, которые вынуждают систему менять частоту собственного колебания.

Литература

1. Обридко В.Н., Наговицын Ю.А. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. – СПб: ВВМ, 466 с. – 2017.
2. Птицына Н.Г., Демина И.М. Частотная модуляция как причина возникновения дополнительных ветвей векового цикла Глейсберга в солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62, № 1. С. 48–61.
3. Gleissberg W. Evidence for a long solar cycle // The Observatory. 1944. V. 65. № 282. P. 123–125.