

## АВТОСТАБИЛИЗАЦИЯ ФАЗЫ ЦИКЛИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

Л. И. Гудзенко, В. Е. Чертопруд

УДК 523,7

Показано, что наблюдаемое ограничение дисперсии фазы солнечной активности не может быть объяснено синхронизацией какими-либо стабильными колебаниями, сторонними для генератора циклической активности. Ограничение это определяется привязкой фазы "в большом", характерной для идеального релаксационного автономного генератора.

Анализ /1,2/ записи чисел Вольфа - основного индекса циклической активности - показал, что генератор колебаний активности является релаксационным. Исследование же длительных записей фазы активности /3/ по косвенным данным указало на существенную стохастическую связь флуктуаций фазы, сохраняющуюся на многих десятках циклов. Эта связь проявляется прежде всего в интерпретируемом тут замедлении роста дисперсии фазы активности.

Будем обозначать (см. /3/):  $\xi_{\tau}(t) \equiv \gamma(t + \tau) - \gamma(t)$  - набег фазы за время сдвига  $\tau$ ,  $\gamma(t) \equiv \theta(t) - t$  - флуктуации фазы; при этом сама фаза  $\theta(t)$  колебаний отсчитывается в единицах времени. Автономным генераторам общего типа, как известно, соответствует диффузионный закон роста со сдвигом  $\tau$  дисперсии фазы  $\langle \xi_{\tau}^2 \rangle \approx 2D\tau$ . Дисперсия же фазы циклической активности изменяется с  $\tau$  по более сложному закону. Пропорциональный вначале сдвигу  $\tau$  рост дисперсии  $\langle \xi_{\tau}^2 \rangle$  затем при  $\tau = (3 \div 4)T_0$ , где  $T_0 \approx 11,2$  года - средний период циклической активности, замедляется и постепенно практически прекращается.

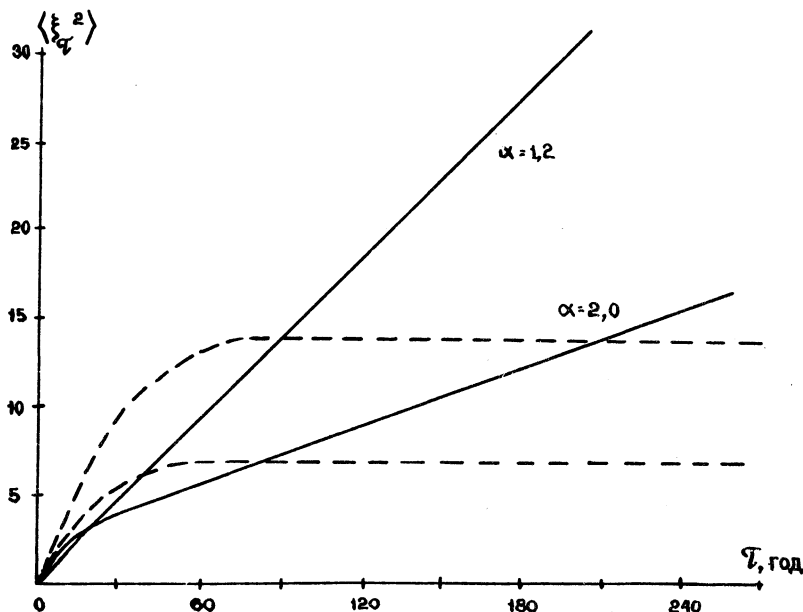
Простейшее объяснение такого хода функции  $\langle \xi_{\tau}^2 \rangle$  состоит в том, что генератор циклических изменений активности не автономен, а синхронизируется более стабильными внешними колебаниями. На роль источника таких колебаний, казалось бы, может претендовать целый ряд явлений, например, воздействие планет, регулярно обращающихся вокруг Солнца, или же автоколебания в механизме выработки энергии внутри самого Солнца или в ее переносе к фотосфе-

ре. Но все такие возможности отвергаются, исходя из конкретных соображений. Так, энергия взаимодействия планет с циклической активностью оказывается во много раз меньше величин, необходимой для синхронизации при наблюдаемом уровне флуктуаций. Значимые же рутулярные колебания выхода солнечной энергии со строгим периодом  $T_0$  были бы надежно зарегистрированы.

Поиски принципиально иного механизма насыщения дисперсии фазы привели к открытию эффекта автостабилизации фазы у идеального релаксационного автономного генератора. Оказалось, что у такого генератора без всякой синхронизации внешней периодической силой динамически устойчива не только частота, но и фаза колебаний. Динамические свойства удержания стабильной фазы в случае внешней синхронизации и при внутренней "автостабилизации" существенно различны. Внешняя синхронизация направлена на устранение только малых (по сравнению с периодом  $T_0$  автономных колебаний) разностей фаз колебаний генератора и синхронизирующей силы. Ясно, что при разности фаз  $\approx T_0$  динамическая ситуация та же, что и при разности  $\approx 0$ . Автостабилизация фазы характеризуется обратной связью в самом автономном релаксационном генераторе, стремящейся ликвидировать любые уходы фазы от устойчивого равновесия. Как будет видно из дальнейшего, это различие характера динамического удержания фазы приводит к заметному отличию зависимости  $\langle \xi_{\tau}^2 \rangle$  от сдвига  $\tau$  для идеального релаксационного автогенератора и для синхронизованного генератора общего типа при высоком уровне флуктуаций.

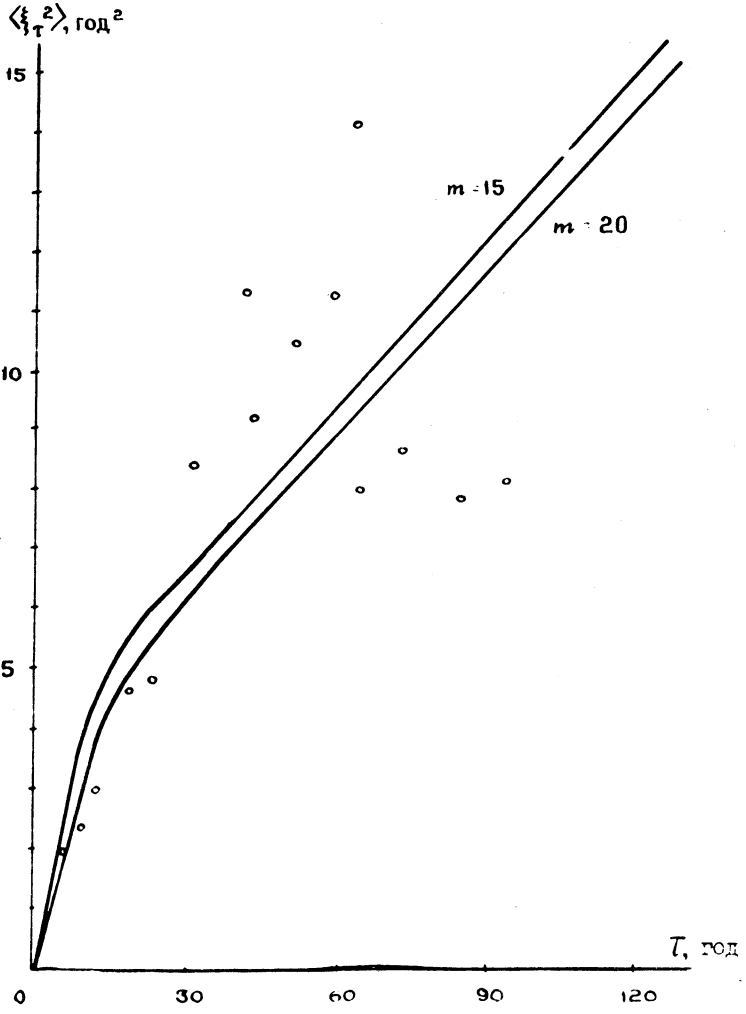
При наличии же в релаксационном автогенераторе малой неидеальности начальное динамическое отклонение его фазы уничтожается не полностью. После установления колебаний остается разбаланс фазы, составляющий небольшую часть начального отклонения. Соответственно и в зависимости дисперсии фазы от сдвига в стохастической модели слаонеидеального автогенератора уже нет полного насыщения. Эффект автостабилизации фазы проявляется здесь в том, что начальный участок сравнительно быстрого увеличения дисперсии набега фазы пропорционально сдвигу  $\tau$  переходит в более медленный (асимптотически линейный с  $\tau$ ) ее рост. На ограниченном интервале наблюдения такой медленный рост неотличим от полного насыщения.

Для выяснения причины насыщения дисперсии фазы циклической активности Солнца важно, что отношение установившегося стандарта  $\sigma \equiv \sqrt{\lim_{\tau \rightarrow \infty} \langle \xi_{\tau}^2 \rangle}$  флуктуаций фазы к периоду  $T_0$  активности не



Р и с. I.

мало; оно составляет  $\sigma/T_0 \sim 0,2 \div 0,3$ . При синхронизации автогенератора общего типа внешним воздействием столь большой установившийся стандарт нереален, поскольку были бы существенны неустраиваемые синхронизацией большие флуктуации фазы  $\delta\varphi \geq T_0/4$ . Это нетрудно показать на простейшем примере, когда шумящий автогенератор томсоновского типа синхронизируется синусоидальным воздействием. В общем же случае аналитическое рассмотрение затруднено. Для убедительного анализа ситуации в случае автогенератора циклической активности Солнца был проведен математический эксперимент. Численное моделирование проводилось на уравнениях /2/ релаксационного генератора активности, полученных путем обработки непосред-



Р и с. 2.

ственных результатов наблюдений. В правую часть этих уравнений кроме коротко-коррелированного шума (известной из опыта интенсивности) включалась синхронизирующая на основной частоте автоколебаний синусоидальная сила  $f \sin(2\pi t/T_0)$ . Результатом машинного расчета являлась средневременная оценка  $(\xi_\tau)^2$  хода дисперсии  $\langle \xi_\tau^2 \rangle$  фазы колебаний такого генератора при разных значениях амплитуды  $f$  синхронизирующей силы.

Пусть  $n_f(t)$  и  $n_0(t)$  - отклонения от предельного цикла автономной динамической системы траекторий исследуемого генератора на фазовой плоскости при наличии и при отсутствии синхронизирующей силы. Соотношение этой внешней силы и внутренних шумов генератора будем характеризовать отношением  $\alpha(f) \equiv \sigma^2 n_f / \sigma^2 n_0$  средних квадратов таких отклонений. На рис. 1 представлена часть результатов численных экспериментов. Сплошные линии - оценки  $(\xi_\tau)_\alpha^2$  при  $\alpha = 1,2$  и  $\alpha = 2,0$ . Шаг вычислений (и интервал корреляции внутреннего шума) составлял 1 год. Точность оценок  $(\xi_\tau)_\alpha^2$  при  $\tau = 6$  составила  $\sigma(\xi_\tau)_\alpha^2 = 0,07 \text{ год}^2$ , при  $\tau = 40 \text{ лет}$   $\sigma(\xi_\tau)_\alpha^2 = 0,2 \div 0,3 \text{ год}^2$ . Пунктиром даны границы 95% доверительной области для наблюдаемого хода  $(\xi_\tau)_0^2$  циклической активности Солнца. Эта область определялась, исходя из модельного описания экспериментальных значений в виде функции  $\langle \xi_\tau^2 \rangle_0 = (2D/\lambda)[1 - \exp(-\lambda\tau)]$ . Из рис. 1 видно, что при  $\alpha = 2$  функция  $(\xi_\tau)_\alpha^2$  значительно не согласуется с ходом  $(\xi_\tau)_0^2$ , в особенности на участке малых сдвигов  $\tau = 30 \div 60 \text{ лет}$ . С ростом амплитуды  $f$  синхронизирующей силы (а значит, и параметра  $\alpha$ ) эта тенденция усиливается. При уменьшении  $f$  (и параметра  $\alpha$ ) растет рассогласование  $(\xi_\tau)_\alpha^2$  и  $(\xi_\tau)_0^2$  на участке больших сдвигов, это иллюстрируется ходом кривой  $(\xi_\tau)_{\alpha=1,2}^2$ . Выбор для расчета другого времени  $\Delta$  корреляции внутренних шумов (и равного шага вычислений  $\Delta = 0,2$  года вместо  $\Delta = 1,0$  год) приводит практически к тем же кривым  $(\xi_\tau)_\alpha^2$ .

В противоречии наблюдений с предположением о синхронизации генератора циклической активности можно убедиться и другим способом, не прибегая к модельному описанию хода  $\langle \xi_\tau^2 \rangle_0$ . На рис. 2, исходя из оценок  $(\xi_\tau)_{\alpha=2,0}^2$  построены 95% доверительные границы максимального выборочного значения  $(\xi_\tau)_{\max}^2$  дисперсии фазы при

объемах выборки  $m = 15$  и  $m = 20$ . В виде отдельных точек нанесены значения  $(\bar{\xi}_T)_m^2$ , полученные из наблюдений; объем выборки составляет здесь  $m \sim 15 \div 20$ . Видно, что эти точки выходят за доверительные границы. Аналогичным образом отвергаются и другие варианты синхронизации.

Таким образом, большое значение установившегося стандарта набега фазы активности позволяет уверенно отбросить предположение о синхронизации циклической активности Солнца какими-либо сторонними стабильными колебаниями.

Поступила в редакцию  
II сентября 1974 года

#### Л и т е р а т у р а

1. Л. И. Гудзенко, В. Е. Чертопруд. *Астроном. журн.* 41, № 4, 697 (1964).
2. В. Е. Чертопруд. *Кандидатская диссертация*, МГУ, 1966 г.
3. Л. И. Гудзенко, В. Е. Чертопруд. *Астроном. журн.* 43, № I, III (1966).