ГОРИЗОНТЫ ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Волобуев Д.М., Макаренко Н.Г.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

SOLAR ACTIVITY PREDICTABILITY HORIZONS

Volobuev D.M., Makarenko N.G.

Pulkovo Observatory, St.-Petersburg, Russia

Chaotic component of solar activity and limited statistics of 24 regular observed solar cycles make the long-term forecast difficult. Enriched statistics of reconstructions from historical observations (about 400 years) and from natural radionuclide deposits (about 9000 years) provide an optimism for longer-term predictions up to hundreds and even thousands years. Are these forecasts feasible? How long can be forecast basing on an uncertain reconstructions? These questions are more related to information theory than to practical forecast.

Here we use known reconstructions of total solar irradiance (TSI) via optical observations (since 1610 AD) and via radionuclides (since 7362 BC) to estimate maximum Lyapunov exponent for 11-year and secular variations respectively using classical algorithm by Wolf et al. (1985). We estimated essentially positive Lyapunov exponents for both cycles and convert them with respective error tolerance for specific reconstruction to get predictability horizons.

With available reconstructions found that predictability horizon is about 10 years for 11-year cycles and about 40 years for their secular envelope, so statistical forecast for longer cycles is hardly possible but reconstructions still can help to forecast an envelope for a few solar cycles.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-103-106

Прогноз солнечной активности является одной из острых тем в солнечной и солнечно-земной физике. Долгосрочные прогнозы осложняются как неопределенностью долговременных временных рядов/реконструкций, так и отсутствием хороших физических моделей. Проблема прогноза следующего 11-летнего цикла [1] или 10 летнего среднего по реконструкции [2] уже является нетривиальной задачей. Однако, известны прогнозы на 500 [3] и 1000 лет [4]. На сколько же можно предсказать солнечную активность из имеющихся данных? Чтобы ответить на этот вопрос, мы используем известные реконструкции полного потока излучения Солнца (TSI) из наблюдательных данных (рис.1) и реконструкций (рис.2), и оцениваем для них горизонт предсказуемости. Для нелинейных динамических систем горизонт предсказуемости можно оценить из максимального показателя Ляпунова λ_{max} :

$$T_p \leq \frac{1}{\lambda_{max}} \ln \left(\frac{\Delta}{\delta} \right) \quad (1)$$

Здесь $\frac{\Delta}{\delta}$ – толерантность ошибки, которую мы определяем здесь как отношение полной амплитуды вариации (размера аттрактора) Δ к средней

ошибке δ ряда. Несмотря на различия реконструкций, толерантность ошибки примерно одинакова, поэтому мы зафиксировали $\frac{\Delta}{\delta} = 5$.

Рис. 1. Ряд TSI [5] (слева) и распределение локальных горизонтов предсказуемости (справа), рассчитанных с параметрами $\tau = 3$ года, $\Delta t_e = 2$ года.

Рис. 2. Реконструкции полного потока излучения Солнца в Голоцене.

Вычисление максимального показателя Ляпунова во многом зависит от используемого алгоритма и входных параметров. Поэтому мы использовали классический алгоритм [8, 9], с рекомендованными параметрами сдвига для пространства Такенса τ , времени отслеживания траектории Δt_e (рис. 3) и фиксировали размерность пространства вложения $D = 3$.

Рис. 3. Отслеживание расходящихся траекторий в алгоритме Вольфа.

В сдвиговом пространстве вложения анализируются пары близких траекторий (рис. 3). При этом максимальный показатель Ляпунова оценивается на конечных отрезках траекторий.

$$\lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \sum_{k=1}^N \ln \frac{d(t_k)}{d_0(t_{k-1})} \quad (2)$$

Что позволяет построить гистограммы его распределения (рис. 1, 4).

Рис. 4. Гистограммы распределения для перспективных (слева) и ретроспективных (справа) горизонтов предсказуемости, построенные для реконструкции [6] (сверху) и [7] (снизу), с параметрами $\tau = 20$ лет, $\Delta t_e = 30$ лет.

Оказалось, что горизонты предсказуемости в будущее (перспективный) и в прошлое (ретроспективный) примерно совпадают за исключением реконструкции [6] (рис.4, вверху), где ретроспективный горизонт более чем вдвое превосходит перспективный.

Выводы

- Оценка горизонта предсказуемости из максимального показателя Ляпунова для 11-летних вариаций TSI составляет порядка 10 лет.
- При этом незначительное количество отрезков траекторий могут предсказываться до 22 лет, ретроспективный и перспективный горизонты примерно одинаковы, ретроспективный в среднем немного ближе.
- Для вековых вариаций горизонт предсказуемости составляет порядка 40 лет. При этом ретроспективный горизонт существенно дальше перспективного у реконструкции Steinhilber et al. 2009 [6] и близок к перспективного у реконструкции Egorova et al., 2018 [7], что говорит, по-видимому, о большей однородности последней реконструкции.

Работа выполнена при поддержке грантов AP05134227 (Казахстан), РФФИ 19-02-00088-а

Литература

1. *Pesnell W.D.* Solar cycle predictions (invited review) // *Solar Physics*. 2012. Т. 281. №. 1. С. 507-532.
2. *Mordvinov A.V., Skakun A.A., Volobuev D.M.* Long-term Changes in Total Solar Irradiance and Their Predictions // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. Т. 58. №. 8. С. 1175-1186.
3. *Steinhilber F., Beer J.* Prediction of solar activity for the next 500 years // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2013. Т. 118. №. 5. С. 1861-1867.
4. *Zharkova V.V. et al.* Heartbeat of the Sun from Principal Component Analysis and prediction of solar activity on a millenium timescale // *Scientific reports*. 2015. Т. 5. С. 15689.
5. *Coddington O. et al.* A solar irradiance climate data record // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2016. Т. 97. №. 7. С. 1265-1282.
6. *Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C.* Total solar irradiance during the Holocene // *Geophysical Research Letters*. 2009. Т. 36. №. 19.
7. *Egorova T. et al.* Revised historical solar irradiance forcing // *Astronomy & Astrophysics*. 2018. Т. 615. С. A85.
8. *Wolf A. et al.* Determining Lyapunov exponents from a time series // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1985. Т. 16. №. 3. С. 285-317.
9. *Alan Wolf.* Wolf Lyapunov exponent estimation from a time series. (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48084-wolf-lyapunov-exponent-estimation-from-a-time-series>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved October 27, 2019.