ПРИЧИННАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ КЛИМАТИЧЕСКИМ ИНДЕКСОМ PDO И СОЛНЕЧНОЙ ПОСТОЯННОЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 100 ЛЕТ

Скакун А.А.^{1,2}, Волобуев Д.М.¹

¹ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУ АН ИИ, Санкт-Петербург, Россия

A CAUSAL LINK BETWEEN TSI AND CLIMATE INDEX PDO DURING THE LAST CENTURY

Skakun A.A.^{1,2}, Volobuev D.M.¹

¹Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

A link between the total solar irradiance (TSI) and the Earth climate is the subject of great interest for both the climatology and non-linear dynamics. TSI variability has a small amplitude of about 0.1%, which makes the importance of these variations for climate oscillations questionable due to the insignificant linear correlation. We suggest a hypothesis that there may be a causal relationship between the TSI variations and the Pacific Decadal Oscillation (PDO). This hypothesis can be proved by a scale-dependent conditional dispersion between the monthly variability of climate index forced by TSI during the last century. Considering this empirical measure we confirm that non-linear relation does exist between TSI and the major ocean oscillation.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-343-346

Введение

В последние десятилетия исследования климата стали объектом пристального внимания не только ученых, но и широкой общественности. Несомненно, климат Земли – большая комплексная система, в изменениях которой участвует множество факторов. Один из них – количество солнечного излучения, которое меняется синфазно с активностью солнечного магнитного поля. Вопрос связи между климатом и солнечной активностью стал актуален во времена популярности идей русского космизма [1] и до сих пор является камнем преткновения для исследователей климата. Причинные связи между непрерывными физическими процессами в некоторых случаях могут быть обнаружены с помощью методов обработки временных рядов. В этих методах предполагается, что временные ряды содержат в себе детерминированную хаотическую компоненту [2]. Такое предположение может быть оправдано как в отношении климатических вариаций, так и для рядов солнечной активности.

Исходные данные

В качестве климатического ряда выступает тихоокеанское десятилетнее колебание (PDO, Pacific Decadal Oscillation) на протяжении последних

ста лет. Это колебание с периодом 10–30 лет, для которого характерно увеличение или уменьшение температуры водной поверхности в Тихом океане к северу от 20° с.ш. Индекс PDO определяется как отклонение от среднего значения температуры поверхности океана в северо-восточной части тропической зоны Тихого океана и доступен в базе данных [3]. В роли солнечного форсинга выступил ряд полного потока солнечного излучения (TSI, Total Solar Irradiance). Непосредственные спутниковые наблюдения этой величины доступны только с 1978 года, но реконструкции позволяют нам восстановить этот ряд на более длительное время в прошлом [4]. Для калибровки методов была использована модель аномалий температуры поверхности Тихого океана в виде осциллятора [5], расчет которой производился по формулам (1–2):

$$dh/dt = -T + \xi \quad (1)$$

$$dT/dt + \gamma T = (h + bh^3) + Sf \quad (2)$$

где T – аномалия температуры поверхности восточной экваториальной части Тихого океана, h – аномалия глубины термоклина, ξ – окружающий шум, f – форсинг модели, S – масштабный коэффициент для форсинга, b и γ – модельные параметры.

Рис. 1. Среднемесячные эмпирические и модельные временные ряды. Климатический индекс PDO (a); модельный ряд без солнечного форсинга (b); модельный ряд с форсингом в виде TSI (c); изменения потока солнечной энергии TSI (d). Все данные, приведенные на графиках, нормированы на стандартное отклонение.

Для расчета в нашем случае использовались параметры $b = 3$, $\gamma = 1$ и начальные условия $T(0) = 0.001$, $h(0) = 0$. Для модельного ряда без солнечного форсинга принимаем $S = 0$, т.е. учитывается только вклад шума с амплитудой $\xi = 0.00001$; в случае наличия солнечного форсинга в качестве f использовался ряд TSI с амплитудным коэффициентом $S = 0.005$. Все рассмотренные временные ряды приведены на рис. 1.

Метод условных дисперсий

Для оценки наличия причинной связи используется метод условных дисперсий (MCD, Method of Conditional Dispersion [2]). Он рассматривает фазовые пространства, восстановленные из временных рядов с помощью сдвиговой реконструкции Такенса. В двух полученных из временных рядов фазовых пространствах производится расчет условных дисперсий (σ) по формуле (3), который по сути является проверкой выполнения определенного условия в одной системе при условии ее выполнения в другой. В данном случае в качестве такого условия была выбрана близость точек фазового пространства. Анализ условных дисперсий при изменении условия (ϵ -окрестности точки) позволяет сделать вывод о зависимости между системами. В частности, постоянная σ при любом ϵ говорит о независимости одной системы от другой, а увеличение σ – об обратном. Условная дисперсия зависимости x от y рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{xy}^M(\epsilon) = \left(\frac{\sum_{i \neq j} \|y_i^M - y_j^M\|^2 \theta(\epsilon - \|x_i^M - x_j^M\|)}{\sum_{i \neq j} \theta(\epsilon - \|x_i^M - x_j^M\|)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

где x_i – временной ряд, M – размерность вложения, ϵ – размер выбранной окрестности точки, θ – функция Хевисайда.

Калибровка

Для оценки качества работы метода рассматривались такие пары временных рядов: 1) Модельный ряд без форсинга и TSI; 2) Модельный ряд с форсингом и TSI. Нам заранее известно, что в первом случае причинной связи быть не может, т.к. форсинг в виде TSI не присутствует, а во втором случае эта связь должна наблюдаться. Также проверке подверглись эмпирические ряды – PDO и TSI. Первым этапом в реализации метода была

Рис. 2. Результаты работы метода MCD: зависимость условных дисперсий σ от размера окрестности точки ϵ . Рассмотренные случаи: (a) Ряды PDO и TSI. Кривые пересекаются в области малых ϵ – связь присутствует; (b) Модельный ряд без солнечного форсинга и TSI. Полученные кривые пересекаются, результат неопределим; (c) Модельный ряд с солнечным форсингом и TSI. Кривые не пересекаются, красная идет выше синей – между рядами присутствует причинная связь.

подготовка временных рядов – производилось их сглаживание кубическими сплайнами, чтобы уменьшить влияние шумов и обеспечить эквидистантность временных рядов. Затем для каждого из рядов с помощью расчета корреляционных интегралов была определена корреляционная размерность, которая позволила выбрать размерность вложения $M = 7$ для реконструкции по Такенсу. Величина сдвига по времени была выбрана эмпирическим путем и равняется 6 месяцам. Результаты калибровки метода показаны на рис. 2 (b,c). Подробные комментарии приведены в описании рисунка. Результаты работы метода для эмпирических рядов показаны на рис. 2 (a). Для верификации использовался метод Монте-Карло – во временные ряды перед сглаживанием добавлялась шумовая компонента и после усреднения 30 таких процедур были получены планки погрешностей для оценки причинной связи между данными временными рядами.

Метод верно показал, что в случае отсутствия солнечного форсинга в модельном ряде условная дисперсия не обнаруживает значимых признаков наличия причинной связи, а при наличии форсинга в модельном ряде асимметрия условной дисперсии ярко проявляется на всех масштабах демонстрируя наличие причинности. Таким образом, метод MCD может применяться для эмпирических рядов PDO и TSI и показывает наличие связи между этими временными рядами.

Выводы

- Метод условных дисперсий показал, что вариации полного потока солнечного излучения TSI влияют на климатический индекс PDO на протяжении последних 100 лет.
- В моделях, описывающих колебания температур Тихого океана, необходимо обязательно учитывать влияние вариаций полного потока солнечного излучения.

Литература

1. *Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь. – Рипол Классик, 1973.
2. *Čenys A., Lasiene G., Pyragas K.* Estimation of interrelation between chaotic observables // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1991. Т. 52. № 2-3. С. 332-337.
3. База данных PDO <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>
4. База данных TSI http://lasp.colorado.edu/lisird/data/nrl2_tsi_P1M
5. *White W.B., Liu Z.* Nonlinear alignment of El Nino to the 11-yr solar cycle // *Geophysical Research Letters*. 2008. Т. 35. No. 19.