СИНХРОНИЗАЦИЯ, ПРИЧИННОСТЬ И ОБРАТИМОСТЬ В СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКЕ

Волобуев Д.М., Макаренко Н.Г.

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

SYNCHRONIZATION, CAUSALITY AND TIME-REVERSABILITY IN SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS

Volobuev D.M., Makarenko N.G.

Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia

Solar-terrestrial links are studied during centuries. Despite numerous models are developed for explaining possible mechanisms still a few statistical methods are used for verifying models with empirical data. Most of empirical data are available as time series or indices but only a few recent decades are presented with images and matrix data. Considering vector or scalar time series we can use generalized synchronization theory (GST) to identify causal links. We discuss the applicability of different methods originated from GST to particular problems of solar-terrestrial physics. As an example we calculate conditional dispersion for total cloudiness fraction versus galactic cosmic rays (GCR) or total solar irradiance (TSI) as possible causes. We found that GCR can be the cause of total cloudiness fraction variations, but not TSI. As another example we calculate granger causality for normal and time-reversed Wolf numbers, sunspot areas and global earth surface temperature. We found that Wolf numbers and global earth surface temperature are not reversible in time having a backward and forward arrow of time respectively.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-57-60

Исследования причинности по эмпирическим временным рядам известно в эконометрии [1], экологии [2] и исследованиях климата [3]. Мы пытались ранее применить эти методы для исследования асимметрии динамики между полушариями Солнца [4]. Большая часть экспериментальных данных, которые используются для обнаружения Солнечно-Земных связей, доступны в виде временных рядов; изображения появились, в основном, в эпоху спутниковых наблюдений. Ряды содержат гео/гелиофизические характеристики, которые отображают пространственно-временную сложность систем на Солнце и Земле в скалярные, или векторные временные последовательности. Можно ли такие ряды рассматривать как детерминированно-порожденную наблюдаемую в смысле Такенса [5]? Насколько обратная реконструкция, как топологическое вложение, эквивалентна исходной системе? Эти вопросы важны, поскольку "наблюдаемая" по Такенсу предполагает существование аттрактора и типичность проекции на первую координату, что эквивалентно свойствам сильного перемешивания в системе. Поскольку взаимодействующие системы на Солнце и Земле являются термодинамически открытыми и нестационарными, тео-

рема существования и единственности решения для динамических уравнений может отсутствовать. В этой ситуации, детектирование солнечно-земных связей может опираться на набор простых техник, обеспечивающих математически правдоподобный результат.

Целью нашей работы является анализ эффективности методов условной дисперсии [6] и причинности по Грейнджеру [1] для задач выявления Солнечно-Земных связей. В качестве примера мы рассмотрим задачу о связи облачности с потоком галактических космических лучей (ГКЛ) и задачу обратимости рядов во времени.

В тесте Грейнджера на причинность [1] проверяются нулевые гипотезы для временных рядов $x(t)$ и $y(t)$ длиной n : « y не является причиной x » и « x не является причиной y ». Для проверки этих гипотез строятся авторегрессии с *подмешиванием* в них регрессии по тестируемой переменной. Например, для первой гипотезы:

$$x(t) = a_0 + a_1 x(t-1) + \dots + a_p x(t-p) + b_1 y(t-1) + \dots + b_p y(t-p) + \xi(t) \quad (1)$$

Глубина регрессии p определяется по минимуму Байесовской информации.

Для проверки гипотезы используется F -тест, $F = \frac{RSS_R - RSS_U}{RSS_U} \frac{n-2p}{p}$, сравне-

ния ошибки регрессионной аппроксимации для $x(t)$ с использованием (UR) и без использования (R) второго ряда $y(t)$. Для расчетов мы использовали вариант алгоритма [7]. Уравнение (1) постулирует линейные связи. Проверка возможных нелинейных связей требует методов, основанных на эмбедологии [5], таких как условные дисперсии [6] или более новый метод ССМ [2], который, мы полагаем, более подвержен ошибкам на малых масштабах. Метод условных дисперсий [6] основан на синхронном анализе статистики расстояний σ в пространстве вложений в зависимости от мас-

штаба ε . $\sigma_{xy}^M(\varepsilon) = \left(\frac{\sum_{i \neq j} \|y_i^M - y_j^M\|^2 \theta(\varepsilon - \|x_i^M - x_j^M\|)}{\sum_{i \neq j} \theta(\varepsilon - \|x_i^M - x_j^M\|)} \right)^{1/2}$, где $\{x_i\}$ – временной ряд, M – размерность вложения, θ – функция Хевисайда. Значение $\sigma(\varepsilon) \approx const$ при любом ε реферируется как независимость одной системы от другой; в противном случае говорят о зависимости.

Рассмотрим теперь применение этих двух методов. Гипотеза о воздействии ГКЛ на облачность широко обсуждалась в литературе [8], однако она не была убедительно ни доказана, ни опровергнута. В частности, предполагается эффект корреляции противоположный по знаку для низкой и высокой облачности [9]. На рис. 1 представлена условная дисперсия (3) между рядами полной облачности [10] и ГКЛ [11] (левая панель) и облачности и полного потока излучения (TSI). [12] за период 1980–2020. Причинность по Грейнджеру отсутствует в обоих случаях ($F < C_v$). Однако рис. 1 (правая панель) подтверждает нелинейную связь между облачностью и потоком галактических космических лучей, а рис. 1 (левая панель)

отвергает наличие связи между облачностью и TSI. Таким образом, условная дисперсия более универсальна, чем причинность по Грейнджеру, проверяя более общую базовую гипотезу нелинейных связей.

Рис. 1. Условная дисперсия (σ) vs $\log(\epsilon)$ для проверки гипотезы, что облачность (C) зависит от космических лучей (CR) (левая панель) или гипотезы, что C зависит от TSI (правая панель).

Рассмотрим, далее, задачу об обратимости рядов. Поставим задачу определить из временного ряда, является ли в нем прошлое причиной (по Грейнджеру) его будущего. Поскольку прошлое многих рядов было реконструировано по различным прокси данным, имеет смысл проверить и обратную гипотезу: является ли будущее причиной для прошлого.

Рис. 2. Причинность по Грейнджеру, примененная к исследованию обратимости чисел Вольфа, площадей пятен, полного потока излучения Солнца и глобальной приземной температуры. $F_b > C_{v_f}$ – критерий для отбрасывания нулевой гипотезы что ряд не является причинным по Грейнджеру в прямом, либо в обратном ($F_b > C_{v_b}$) направлении времени.

Обозначения: W(1700-2014) – среднегодовое число Вольфа v_2 [13], A(1874_2019 y (m, d) – среднегодовая (среднеоборотная, ежедневная) площадь солнечных пятен [14], TSI – реконструкция полного потока излучения Солнца [15], NHT – инструментальные [16] и реконструированные [17] данные по приземной температуре Северного полушария.

Для этого разделим ряд на две равные части, и проверим первую гипотезу, затем обратим во времени, и проверим вторую гипотезу. Результаты представлены на рис. 2.

Выводы

Мы показали возможность нелинейной связи между ГКЛ и облачностью, при этом линейная связь (по Грейнджеру) отсутствует. Среднегодовые площади пятен, как и индексы Вольфа имеют асимметрию во времени: будущее является причиной прошлого, но не наоборот. Прошлые среднегодовые температуры являются Грейнджер-причиной будущих, но не наоборот. Среднемесячные площади пятен являются, симметрично, собственной Грейнджер-причиной, так же как реконструкция TSI [15] в Голоцене.

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

Литература

1. *Granger C.W.J.* Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods // *Econometrica: journal of the Econometric Society*. 1969. С. 424-438.
2. *Clark A.T. et al.* Spatial convergent cross mapping to detect causal relationships from short time series // *Ecology*. 2015. Т. 96. № 5. С. 1174-1181.
3. *Verbitsky M.Y. et al.* Detecting causality signal in instrumental measurements and climate model simulations: global warming case study // *Geoscientific Model Development*. 2019. Т. 12. № 9.
4. *Volobuev D.M., Makarenko N.G.* The dynamic relation between activities in the Northern and Southern solar hemispheres // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. Т. 56. №. 7. С. 880-885.
5. *Sauer T., Yorke J.A., Casdagli M.* Embedology // *Journal of statistical Physics*. 1991. Т. 65. № 3-4. С. 579-616.
6. *Čenys A., Lasiene G., Pyragas K.* Estimation of interrelation between chaotic observables // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1991. Т. 52. № 2-3. С. 332-337.
7. Chandler (2020). Granger Causality Test (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25467-granger-causality-test>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved October 18, 2020.
8. *Pudovkin M.I., Veretenenko S.V.* Cloudiness decreases associated with Forbush-decreases of galactic cosmic rays // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1995. Т. 57. № 11. С. 1349-1355.
9. *Yu F.* Altitude variations of cosmic ray induced production of aerosols: Implications for global cloudiness and climate // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2002. Т. 107. № A7. С. SIA 8-1-SIA 8-10.
10. Dataset accessed 2020-10-19 at <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>
11. Dataset accessed 2020-10-19 at <http://cosmicrays oulu.fi/>
12. *Coddington O. et al.* Recent Advances of the NOAA Solar Irradiance Climate Data Record and Comparisons with Independent Datasets // *EGUGA*. 2018. С. 5539.
13. Dataset accessed 2020-10-19 at <http://www.sidc.be/silso/datafiles>
14. *Mandal S. et al.* Sunspot area catalog revisited: Daily cross-calibrated areas since 1874* – 2020 // *A&A* 640, A78 (2020) <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037547D>
15. *Egorova T. et al.* Revised historical solar irradiance forcing // *Astronomy & Astrophysics*. 2018. Т. 615. С. A85.
16. GISTEMP Team, 2020: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies. Dataset accessed 2020-10-19 at data.giss.nasa.gov/gistemp/.
17. *Jones, et al., 1998*, Millennial Temperature Reconstructions. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series #1998-039. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.