

О возможном влиянии солнечного квазидвухвекового цикла на температуру Северного полушария Земли

© М.Г. Огурцов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: maxim.ogurtsov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2025 г.

В окончательной редакции 8 июля 2025 г.

Принято к публикации 17 июля 2025 г.

Исследована возможность связи между квазидвухсотлетней вариацией в температуре Северного полушария Земли и солнечным циклом Жюсса. Рассчитаны коэффициенты линейной и нелинейной корреляции между квазидвухсотлетними циклами в температуре и солнечной активности. Коэффициенты нелинейной корреляции вычислялись на основании оценок взаимной информации. Оказалось, что в большинстве случаев значимость нелинейной корреляции существенно выше, чем линейной. Полученный результат указывает на то, что связь между квазидвухсотлетними циклами в температуре Северного полушария и солнечной активностью может иметь нелинейный характер.

Ключевые слова: солнечная активность, солнечная палеоастрофизика, климат.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61783.227-25

Введение

Солнце является главным источником энергии, поступающей в климатическую систему Земли, поэтому возможное воздействие солнечной активности на климат давно и активно изучается. Неуклонно развивающиеся методы солнечной палеоастрофизики и палеоклиматологии позволяют тестировать солнечно-климатические связи на временных промежутках до нескольких тысяч лет. Анализ доступной палеоклиматической информации показал, что в климате как отдельных регионов Земли, так и Северного и Южного полушария в целом, присутствует квазидвухвековая (период примерно 200 лет) периодичность [1]. Период этой вариации близок к периоду квазидвухсотлетнего солнечного цикла Жюсса. Однако в работе [1], в которой связь квазидвухсотлетней температурной вариации с циклом Жюсса тестировалась при помощи коэффициента линейной корреляции, обнаружить такую связь не удалось. Был сделан вывод о возможном присутствии в климате Земли собственных естественных вариаций с периодами, близкими к периодам солнечных циклов, но не связанных с активностью Солнца, которые могут существенно искажать солнечные сигналы и затруднять их выявление. В настоящей работе предпринята попытка поиска нелинейной связи между квазидвухвековыми вариациями температуры Северного полушария и солнечной активности при помощи коэффициентов нелинейной корреляции, вычислявшихся на основании оценок взаимной информации.

1. Материалы и методы

В настоящей работе были использованы: — шесть реконструкций солнечной активности [2–8], получен-

ных при помощи методов палеоастрофизики Солнца, в основном с использованием данных по концентрации космогенных изотопов в земных архивах; — семь реконструкций температуры Северного полушария и его внетропической части [9–16]. Основным источником информации служили кольца деревьев, дополнительными — концентрация стабильных изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в земных архивах, пыльца растений, ленточные глины, исторические документы.

Для выделения двухсотлетних вариаций была использована вэйвлетная фильтрация в полосе периодов (диапазоне) 172–260 лет, производившаяся с помощью вещественного базиса МНАТ [17]. Вэйвлет МНАТ имеет хорошее временное разрешение и поэтому хорошо подходит для выявления различных спектральных компонент сигнала. Наличие связи между исследуемыми рядами тестировалось при помощи коэффициентов линейной (R_l) и нелинейной (R_{nl}) корреляции. Коэффициент нелинейной корреляции [18]:

$$R_{nl} = \sqrt{1 - \exp(-2MI)} \quad (1)$$

где MI — взаимная информация, которая описывает количество информации, содержащееся в одной случайной величине относительно другой. Эту величину можно интерпретировать, как способность предсказывать один временной ряд, используя другой в качестве источника информации. Коэффициент нелинейной корреляции уже применялся достаточно успешно в климатологии [19]. Значимость корреляции между вэйвлетно фильтрованными рядами была оценена с помощью статистического эксперимента, описанного в работе [20].

Таблица 1. Коэффициенты линейной корреляции между температурами Северного полушария и солнечной активностью, рассчитанные на промежутках, охватывающих последние 1–2 тысячелетия. Все временные рядывейвлетно фильтрованы в диапазоне 172–260 лет

Источник	Usoskin et al. [5]	Muscheler et al. [2]	Horiuchi et al. [3]	Steinhilber et al. [4]	Usoskin et al. [7]	Egorova et al. [6]
Moberg et al. [10]	−0.03 (>0.32)	−0.06 (>0.32)	−0.05 (>0.32)	0.18 (>0.32)	0.42 (0.22)	0.10 (>0.32)
Loehle [11]	0.22 (>0.32)	0.017 (>0.32)	−0.11 (>0.32)	0.12 (>0.32)	0.31 (>0.32)	0.25 (>0.32)
Christiansen, Ljungqvist [12]	−0.04 (>0.32)	−0.29 (>0.32)	0.04 (>0.32)	0.20 (>0.32)	−0.18 (>0.32)	0.07 (>0.32)
Schneider et al. [13]	−0.09 (>0.32)	−0.47 (0.12)	0.20 (>0.32)	0.15 (>0.32)	−0.21 (>0.32)	0.15 (>0.32)
Wilson et al. [14]	0.06 (>0.32)	−0.11 (>0.32)	−0.21 (>0.32)	0.39 (0.29)	0.06 (>0.32)	0.19 (>0.32)
Guillet et al. [15]	0.06 (>0.32)	−0.28 (>0.32)	0.04 (>0.32)	0.19 (>0.32)	0.07(>0.32)	0.14 (>0.32)
Buntgen et al. [16]	−0.24 (>0.32)	−0.28 (>0.32)	0.16 (>0.32)	0.08 (>0.32)	−0.03 (>0.32)	0.06 (>0.32)

Таблица 2. Коэффициенты нелинейной корреляции между температурами Северного полушария и солнечной активностью, рассчитанные на промежутках, охватывающих последние 1–2 тысячелетия. Все временные рядывейвлетно фильтрованы в диапазоне 172–260 лет

Источник	Usoskin et al. [12]	Muscheler et al. [9]	Horiuchi et al. [10]	Steinhilber et al. [12]	Usoskin et al. [14]	Egorova et al. [13]
Moberg et al. [10]	0.64 (>0.32)	0.59 (>0.32)	0.64 (>0.32)	0.67 (>0.32)	0.81 (0.07)	0.55 (>0.32)
Loehle [11]	0.64 (>0.32)	0.72 (>0.32)	0.64 (>0.32)	0.62 (>0.32)	0.71 (>0.32)	0.61 (>0.32)
Christiansen, Ljungqvist [12]	0.53 (>0.32)	0.64 (>0.32)	0.65 (>0.32)	0.63 (>0.32)	0.59 (>0.32)	0.55 (>0.32)
Schneider et al. [13]	0.63 (>0.32)	0.67 (>0.32)	0.65 (>0.32)	0.68 (>0.32)	0.63 (>0.32)	0.57 (>0.32)
Wilson et al. [14]	0.70 (0.23)	0.66 (>0.32)	0.76 (0.15)	0.74 (0.18)	0.68 (>0.32)	0.67 (>0.32)
Guillet et al. [15]	0.61 (>0.32)	0.68 (>0.32)	0.63 (>0.32)	0.69 (>0.32)	0.56 (>0.32)	0.61 (>0.32)
Buntgen et al. [16]	0.64 (>0.32)	0.65 (>0.32)	0.62 (>0.32)	0.66 (>0.32)	0.70 (>0.32)	0.67 (>0.32)

2. Результаты и дискуссия

Результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

В обеих таблицах жирные цифры описывают коэффициенты корреляции, значимость p (вероятность нуль-гипотезы) которых менее 0.32 (уровень 1σ). Крупные жирные цифры — $p < 0.10$.

Проведенные расчеты показали, что, хотя в обоих случаях значимость корреляций невысока, для нелинейной корреляции она ощутимо выше, чем для линейной. Для линейного коэффициента корреляции лишь в двух случаях из 42 вероятность нуль-гипотезы оказывается менее 0.32 (1σ) и ни в одном — менее 0.1. Для нелинейного коэффициента корреляции значимость менее 0.32 в четырех случаях, а для рядов [7] и [10] достигается достаточно высокий уровень значимости $p = 0.07$. Это указывает на то, что реальная связь между квазидвухсотлетними вариациями температуры и солнечной активно-

сти все же существует, но носит нелинейный характер. Кроме того, солнечный сигнал может искажаться, во-первых, естественными климатическими шумами, во-вторых, квазидвухсотлетней вариацией вулканической активности [20].

Выводы

Статистический анализ шести реконструкций солнечной активности и семи палеореконструкций температуры Северного Полушария, охватывающих временные промежутки до 2000 лет, показал, что связь между квазидвухсотлетними циклами в температуре и солнечной активности может существовать, но иметь при этом нелинейный характер и искажаться естественно-природными вариациями. Выявление и изучение солнечного влияния на климат в таком случае оказывается непростой задачей, решение которой требует в

том числе и серьезного усовершенствования методов математической статистики.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.Г. Огурцов. Геоман. астрономия, (2025). В печати.
- [2] R. Muscheler, F. Joos, J. Beer, S.A. Müller, M. Vonmoos, I. Snowball. *Quat. Sci. Rev.*, **26**, 82 (2007). DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.07.012
- [3] K. Horiuchi, T. Uchida, Yu. Sakamoto, A. Ohta, H. Matsuzaki, Ya. Shibata, H. Motoyama. *Quaternary Geochronology*, **3** (3), 253 (2008). DOI: 10.1016/j.quageo.2008.01.003
- [4] F. Steinhilber, J. Abreu, J. Beer, F. Wilhelms. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **109** (16), 5967 (2012). DOI: 10.1073/pnas.1118965109
- [5] G. Usoskin, G. Hulot, Y. Gallet, R. Roth, A. Licht, F. Joos, G.A. Kovaltsov, E. Thébault, A. Khokhlov. *Astron. Astrophys.*, **562**, L10 (2014). DOI: 10.1051/0004-6361/201423391
- [6] T. Egorova, W. Schmutz, E. Rozanov, A.I. Shapiro, I. Usoskin, J. Beer, R.V. Tagirov, T. Peter. *Astron. Astrophys.*, **615**, A85 (2018). DOI: 10.1051/0004-6361/201731199
- [7] G. Usoskin, S.K. Solanki, N.A. Krivova, B. Hofer, G.A. Kovaltsov, L. Wacker, N. Brehm, B. Kromer. *Astron. Astrophys.*, **649**, A141 (2021). DOI: 10.1051/0004-6361/202140711
- [8] T. Egorova, W. Schmutz, E. Rozanov, A.I. Shapiro, I. Usoskin, J. Beer, R.V. Tagirov, T. Peter. *Astron. Astrophys.*, **615**, A85 (2018). DOI: 10.1051/0004-6361/201731199
- [9] J. Esper, E.R. Cook, F.H. Schweingruber. *Science*, **295**, 2250 (2002). DOI: 10.1126/science.1066208
- [10] A. Moberg, D.M. Sonechkin, K. Holmgren, N.M. Datsenko, W. Karlén. *Nature*, **433**, 613 (2005). DOI: 10.1038/nature03265
- [11] C. Loehle. *Energy Environ.*, **18**, 1049 (2007). DOI: 10.1260/095830507782616797
- [12] B. Christiansen, F.C. Ljungqvist. *Clim. Past.*, **8**, 765 (2012). DOI: 10.5194/cp-8-765-2012
- [13] L. Schneider, J.E. Smerdon, U. Büntgen, R.J.S. Wilson, V.S. Myglan, A.V. Kirdyanov, J. Esper. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 4556 (2015). DOI: 10.1002/2015GL063956
- [14] R. Wilson, K. Anchukaitis, K.R. Briffa, U. Büntgen, E. Cook, R. D'Arrigo, N. Davi, J. Esper, D. Frank, B. Gunnarson, G. Hegerl, S. Helama, S. Klesse, P.J. Krusic, H.W. Linderholm, V. Myglan, T.J. Osborn, M. Rydval, L. Schneider, A. Schurer, E. Zorita. *Quat. Sci. Rev.*, **134**, 1 (2016). DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.12.005
- [15] S. Guillet, Ch. Corona, M. Stoffell, M. Khodri, F. Lavigne, P. Ortega, N. Eckert, P.D. Sielenou, V. Daux, O.V. Churakova (Sidorova), N. Davi, J.-L. Edouard, Yo. Zhang, B.H. Luckman, V.S. Myglan, J. Guiot, M. Beniston, V. Masson-Delmotte, C. Oppenheimer. *Nat. Geosci.*, **10**, 123 (2017). DOI: 10.1038/ngeo2875
- [16] U. Büntgen, K. Allen, K.J. Anchukaitis, D. Arseneault, É. Boucher, A. Bräuning, S. Chatterjee, P. Cherubini, O.V. Churakova (Sidorova), Ch. Corona, F. Gennaretti, J. Gieseinger, S. Guillet, J. Guiot, B. Gunnarson, S. Helama, Ph. Hochreuther, M.K. Hughes, P. Huybers, A.V. Kirdyanov, P.J. Krusic, J. Ludescher, W.J.-H. Meier, V.S. Myglan, K. Nicolussi, C. Oppenheimer, F. Reinig, M.W. Salzer, K. Seftigen, A.R. Stine, M. Stoffel, S.St. George, E. Tejedor, A. Trevino, V. Trouet, J. Wang, R. Wilson, B. Yang, G. Xu, J. Esper. *Nat. Commun.*, **12**, 3411 (2021). DOI: 10.1038/s41467-021-23627-6
- [17] C. Torrence, G.P. Compo. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **79**, 61 (1998). DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2
- [18] H. Joe. *J. Am. Stat. Assoc.*, **84**, 157 (1989). DOI: 10.1080/01621459.1989.104
- [19] T.M. Vu, A.K. Mishra, G. Konapala. *Entropy*, **20**, 38 (2018). DOI: 10.3390/e20010038
- [20] M.G. Ogurtsov. *Atmosphere*, **15** (11), 1373 (2024). DOI: 10.3390/atmos15111373