

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕКОНСТРУКЦИИ 11-ЛЕТНИХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО РАДИОУГЛЕРОДУ

Волобуев Д.М.¹, Кудрявцев И.В.², Макаренко Н.Г.¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

PROBLEMS AND PROSPECTS OF RECONSTRUCTION OF 11-YEAR CYCLES OF SOLAR ACTIVITY BY RADIOCARBON

Volobuev D.M.¹, Koudryavtsev I.V.², Makarenko N.G.¹

¹Pulkovo Observatory, St Petersburg, Russia

²Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

The radiocarbon dating curve with a decade time step has been known for more than half a century and is the main, the most accurate way of dating archaeological finds. Overlapping patterns of ring thicknesses of preserved tree remains will allow to build a chronology for more than 10000 years. Accordingly, a number of authors have reconstructed the secular variations in solar activity over the Holocene period. Modern mass spectrometers are less demanding on the amount of material in a sample, therefore, more and more dating curves with one-year time step, lasting up to 1000 and more years, are appearing. Such curves, in theory, should reflect the main, 11-year variations in solar activity. However, the amplitude of the 11-year variations in radiocarbon content is comparable to the measurement error, and the path of the radiocarbon atom after its formation in the atmosphere until it reaches the tree ring is very complicated and subject to a number of changing factors. In this paper, we discuss possible approaches to reconstructing 11-year cycles of solar activity from radiocarbon data. We found that all approaches allow identifying the presence of 11-year cycle, but their amplitudes and phases may depend on methods and approaches. Moreover, no approach is able to fit well amplitudes and phases of all observed solar cycles since 1700 using available data and their measurement errors. Small cycles are more uncertain because of their amplitude is well below reported errors in radiocarbon but big cycles are often well identified. We found that big cycles with annual sunspot number exceeding 500 might appear at the end of 12th century.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-73-76>

Введение

Относительное содержание радиоуглерода $\Delta^{14}\text{C}$ в кольцах деревьев является продуктом взаимодействия галактических космических лучей (ГКЛ) с атмосферным азотом и отражает изменения солнечной активности, из-за рассеяния космических лучей межпланетным магнитным полем [1]. Временные ряды погодичного содержания радиоуглерода представляют большой интерес для физики Солнца и могут быть использованы для исследования поведения 11-летних циклов в прошлом [1]. Один из последних радиоуглеродных рядов [2] был также преобразован в число солнечных пятен [3] с нумерацией всех 11-летних циклов за 1000 лет, с указанием

их максимумов и амплитуд. Однако предложенное преобразование использует некоторые спорные допущения, в частности, коррекцию “медленной” переменной и квадратичное преобразование. В данной работе мы используем нашу эмпирическую (ЕЕМД) и “неоклассическую” 5-резервуарную модель учитывающую изменение климата (ВМ) [5–7], чтобы оценить возможные модельные ошибки и надежность реконструкций.

Исходные данные

Мы использовали погодичные данные об относительном содержании радиоуглерода в кольцах деревьев, полученные в США [4] и данные, полученные в Великобритании и Швейцарии на современном масс-спектрометре [2]. На рис. 1 (слева) эти данные сопоставлены на пересекающемся интервале, видно, что различия в этих региональных данных на временном масштабе 11 лет могут превосходить амплитуду 11-летнего цикла. Для реконструкции на пересекающемся интервале использовался сводный ряд, полученный как взвешенное их обратными ошибками среднее этих рядов. На рис. 1 (слева) этот ряд $\Delta^{14}\text{C}$ инвертирован по знаку.

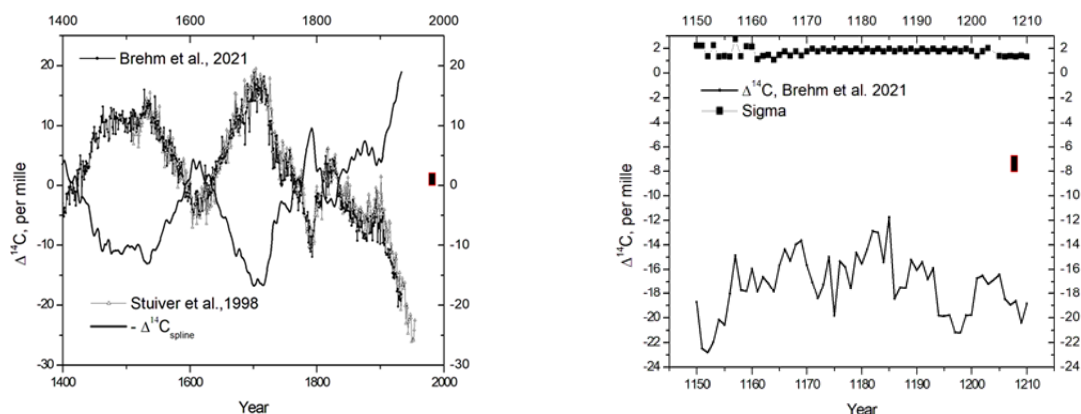


Рис. 1. Слева – исходные погодичные ряды $\Delta^{14}\text{C}$, [2, 4] на пересекающемся временном интервале (1400–1500 гг.), и композитный ряд, использованный для моделирования – $\Delta^{14}\text{C}$, сглаженный сплайном, так, что можно видеть 11-летние вариации. Справа – отрезок ряда [2] в конце 12-го века, показывающий большую амплитуду вариации $\Delta^{14}\text{C}$ на масштабе 11 лет. Черным прямоугольником показана средняя амплитуда 11-летней вариации в радиоуглероде, характерная для настоящего времени.

“Неоклассическая” реконструкция (ВМ)

основана на работах [5–7], но использует в качестве исходного композитный ряд $\Delta^{14}\text{C}$ (рис. 1). В отличие от [3], реконструкция ВМ использует 5-резервуарную модель, данные о содержании CO_2 в атмосфере для коррекции разбавления и данные о температуре для коррекции коэффициентов диффузии CO_2 в океан, как и в [5]. Аналогично [3] и [5], ВМ учитывает

изменение жесткости обрезания ГКЛ при изменении магнитного дипольного момента Земли в прошлом по археомагнитным данным.

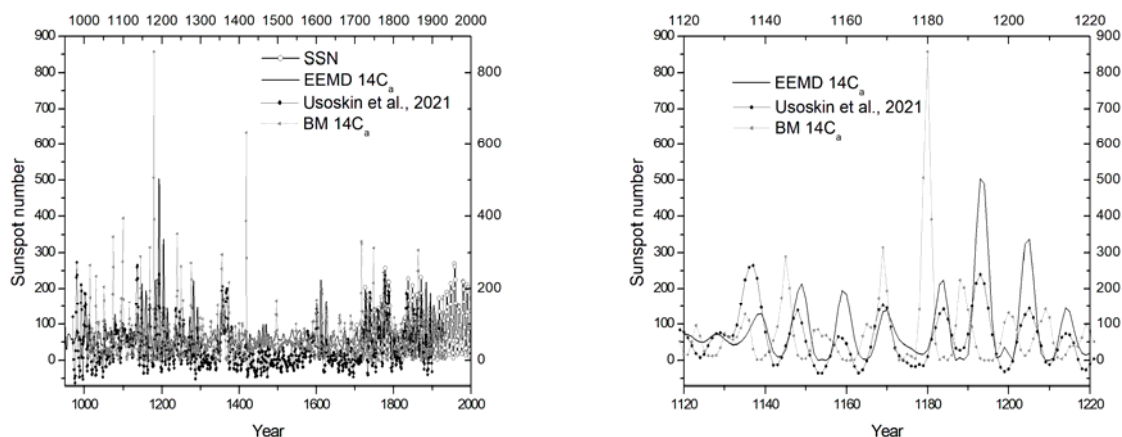


Рис. 2. Реконструкции солнечной активности из погодичного радиоуглерода за 1000 лет (слева) и высокие циклы конца 12 века (справа).

Для выделения 11-летних циклов в модели ВМ после вычисления ге-лиосферного модуляционного потенциала производится удаление тренда, и, аналогично [3], квадратичное преобразование, уменьшающее модуляцию в минимумах и переводящее модуляционный потенциал в шкалу числа солнечных пятен. В отличие от [3], однако, ВМ не использует декадный ряд радиоуглерода для коррекции долговременной огибающей, поэтому в этой реконструкции можно наблюдать несколько высоких 11-летних циклов в конце 12-го века и в начале 14-го века (рис. 2).

Реконструкция EEMD

основана на нахождении коэффициентов для обратной задачи диффузии по методу наименьших квадратов [8] на интервале времени 1700–1950 гг., используя в качестве исходного композитный ряд $\Delta^{14}\text{C}$, сглаженный сплайнами (рис. 1). Калибровка модели производилась на ряде чисел солнечных пятен [9] (SSN, рис. 2). В отличие от [8], обратная задача решалась для отдельных эмпирических мод, полученных с использованием малых шумовых добавок (EEMD, [10]) с последующим суммированием. Дополнительных нелинейных преобразований и коррекции трендов не требовалось. Результат сопоставлен с остальными на рис. 2.

Результаты и выводы

Существующие ошибки измерений и модельные ошибки не позволяют надежно восстановить 11-летние циклы по радиоуглеродным данным.

Тем не менее, высокие циклы восстанавливаются более надежно, чем низкие. На основе имеющихся радиоуглеродных данных есть основания

предполагать наличие беспрецедентно высоких (в два-три раза выше современных) 11-летних циклов в конце 12-го века. Косвенным следствием этого могло являться известное средневековое потепление климата, приведшее, в частности, к образованию поселений викингов на побережье Гренландии.

Литература

1. *Damon, P.E., Long, A. and Wallick, E.I.* On the magnitude of the 11-year radiocarbon cycle // *Earth and planetary science letters*, 1973, 20(3), pp.300-306.
2. *Brehm, N., Bayliss, A., Christl, M., et al.* Eleven-year solar cycles over the last millennium revealed by radiocarbon in tree rings // *Nature Geoscience*, 2021, 14(1), pp.10-15.
3. *Usoskin, I.G., Solanki, S.K., Krivova, N.A., et al.* Solar cyclic activity over the last millennium reconstructed from annual ^{14}C data // *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 649, p.A141.
4. *Stuiver, M., P.J. Reimer and T.F. Braziunas.* High-Precision Radiocarbon Age Calibration for Terrestrial and Marine Samples // *Radiocarbon*, 1998, 40, 1127-1151.
5. *Larionova, A.I., Dergachev, V.A., Kudryavtsev, I.V., et al.* Radiocarbon data from the late 18th century as a reflection of solar activity variation, natural climate change, and anthropogenic activity // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020, 60, pp.840-845.
6. *Kudryavtsev, I.V., Volobuev, D.M., Dergachev, V.A., et al.* Reconstructions of the ^{14}C cosmogenic isotope content from natural archives after the last glacial termination // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, 56, pp.858-862.
7. *Kudryavtsev, I.V., Volobuev, D.M., Dergachev, V.A., et al.* Reconstruction of the Production Rate of Cosmogenic ^{14}C in the Earth's Atmosphere for 17 000–5000 BC // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, 58, pp.925-929.
8. *Volobuev, D.M. and Makarenko, N.G.* Radiocarbon version of 11-year variations in the interplanetary magnetic field since 1250 // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, 55, pp.938-944.
9. WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels <https://www.sidc.be/SILSO/datafiles>
10. *Wu, Z. and Huang, N.E.* Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method // *Advances in adaptive data analysis*, 2009, 1(01), pp.1-41.