**ПЕРИОДЫ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ ЗНАЧЕНИЙ
СКОРОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ КОСМОГЕННОГО ^{14}C
И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДАННЫМ О СОДЕРЖАНИИ
ИЗОТОПА ^{40}Ar В СЛОЯХ ЛЬДА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 4000 ЛЕТ**

Дергачев В.А.¹, Кудрявцев И.В.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

²ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

**PERIODS OF EXTREMELY HIGH VALUES OF COSMOGENIC ^{14}C
PRODUCTION RATE AND TEMPERATURE CHANGES IN
ACCORDANCE WITH THE ISOTOPE ^{40}Ar CONTENT IN ICE LAYERS
FOR THE LAST 4000 YEARS**

Dergachev V.A.¹, Kudryavtsev I.V.^{1,2}

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

²Central Astronomical Observatory of RAS, St. Petersburg, Russia

The radiocarbon data from 2000 BC are considered. The results of calculation of the cosmogenic isotope ^{14}C production rate and the reconstruction of the heliospheric modulation potential are presented. This reconstruction takes into account the climatic changes on the basis of isotope ^{40}Ar content data in Greenland ice. The reconstruction of the heliospheric modulation potential shows the set of global minima of solar activity: Maunder, Spoerer, Wolf, Oort minima and minimum during 690–790 BC. It is shown also that spikes in the radiocarbon data in 535 BC and 140 AD, 695 AD, AD could be result of the powerful solar flares or the bursts of galactic cosmic rays.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-141-144

1. Введение

Вариации солнечной активности (СА) приводят к модуляции интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) при их распространении в гелиосфере, что позволяет использовать данные по космогенному радиоуглероду для изучения СА в прошлые столетия и тысячелетия. Однако изменения земного климата и геомагнитного поля приводят к искажению информации о СА, зафиксированной в радиоуглеродных данных. В работе рассматриваются данные по изменению содержания радиоуглерода в земной атмосфере ($\Delta^{14}\text{C}$) с начала 2-го тысячелетия до нашей эры по середину 18-го века нашей эры. В этот временной интервал зафиксированы периоды аномально низкой активности Солнца: минимумы Маундера (≈ 1645 – 1715 гг. н.э.), Шпёрера (≈ 1400 – 1510 н.э.), Вольфа (≈ 1300 гг. н.э.) и Оорта (≈ 1050 гг. н.э.). При этом, если первые два из упомянутых минимумов активно изучаются в последнее время, то более отдаленные минимумы СА менее изучены.

Фундаментальную роль в изменениях климатической системы Земли играют температуры Мирового океана и полярные ледниковые шапки. По-

лярные ледяные керны являются превосходными архивами климатической истории Земли на интервале времени последних сотен тысяч лет. В настоящей работе мы используем данные реконструкции температуры из элементных и изотопных отношений аргона в слоях льда Гренландского ледникового щита за последние 4000 лет.

В течение последних двух десятилетий успешно развивается метод определения изменений температуры воздуха и средней температуры в океане, основанный на использовании элементных и изотопных отношений аргона и азота и тяжелых инертных газов (криптона и ксенона), содержащихся в кернах льда в захваченных из атмосферы пузырьках воздуха, который сохраняется в течение длительных периодов времени [1]. Недавние достижения в техниках измерений содержания изотопов обострили точность оценок изменения температуры, что позволяет определять изменения температуры с высокой временным разрешением во льдах Гренландии, что, в свою очередь, обеспечивает возможности понять изменение климата в прошлые эпохи.

2. Вариации содержания изотопа ^{14}C в атмосфере Земли и гелиосферный модуляционный потенциал с 2-го тысячелетия до н. э.

На рис. 1А приведены данные по относительному содержанию изотопа ^{14}C ($\Delta^{14}\text{C}$) в земной атмосфере, начиная с 2-го тысячелетия до н.э. [2]. На данном временном интервале значение $\Delta^{14}\text{C}$ достигает своего абсолютного минимума в середине 1-го тысячелетия н.э. Также наблюдается ряд минимумов и максимумов, из последних стоит выделить максимумы 1860, 1365, 725, 340 гг. до н.э. и 695, 785, 1055, 1330, 1530 (минимум СА Шпёра), 1710 (минимум СА Маундера) гг. н.э. Кривая $\Delta^{14}\text{C}$ отражает отклонение отношения концентрации изотопов ^{14}C и ^{12}C от стандартного значения. Для реконструкции скорости генерации изотопа ^{14}C в атмосфере $Q(t)$ под действием КЛ необходимо учитывать и изменения климата, приводящие к перераспределению CO_2 между природными резервуарами. На рис. 1Б представлено изменение концентрации CO_2 в земной атмосфере [4]. Рост CO_2 в 13-м веке н.э. сменяется спадом, который соответствует Малому Ледниковому Периоду (МЛП). Изменение глобальной температуры [5] и температуры Гренландии [6], полученные на основе содержания изотопа ^{40}Ar в годовых слоях льда за последние 4000 лет, приведены на рис. 1В и Г соответственно (толстой линией показано усреднение за 100 лет). В этих данных находит отражение МЛП, рост температуры во второй половине первого тысячелетия н.э. Однако имеются и существенные различия, что может приводить к отличию получаемых результатов от результатов, полученных с использованием температурных данных [6] работы [7], в которой использовались данные [5]. Метод расчета $Q(t)$ подробно описан в [7, 8]. В расчетах будем использовать усредненные по 100 годам значения температуры. Использование температурных данных [6], отражающих температуру годовых слоев льда при их формировании приводит к неко-

тому отличию методики расчетов. Для определения скорости перехода радиоуглерода из верхнего слоя океана в атмосферу будем использовать выражение:

$$\lambda_{mOa} = (1 + k \cdot (T - T_0)) \lambda_{mOa}^0, \quad (1)$$

где k – температурный коэффициент; T – температура в Гренландии [6], усредненная за 100 лет; T_0 – средняя температура T за период 1961–1990 гг., λ_{mOa}^0 – скорость перехода радиоуглерода из океана в атмосферу при $T = T_0$.

Рис. 1. А – изменение $\Delta^{14}\text{C}$ [2]; Б – изменение концентрации CO_2 в земной атмосфере [4]; В – аномалии глобальной температуры [5]; Г – реконструкция температуры в Гренландии [6].

Результаты реконструкции $Q(t)$ на основе радиоуглеродных данных приведены на рис. 2А. Изменение гелиосферного модуляционного потенциала $\varphi(t)$ будем вычислять на основе $Q(t)$. Изменение $\varphi(t)$ отражает изменение СА (рост СА ведет к увеличению значения $\varphi(t)$, а спад – к уменьшению). Способ нахождения $\varphi(t)$ хорошо известен, он подробно изложен в работах [9, 10]. Результаты реконструкции $\varphi(t)$ представлены на рис. 2В.

3. Заключение

На реконструированной временной зависимости $\varphi(t)$ присутствуют все отмеченные выше минимумы СА: Оорта (≈ 1050 гг. н.э.), Вольфа (≈ 1300 гг. н.э.), Шпёрера (≈ 1400 – 1510 гг. н.э.) и Маундера (≈ 1645 – 1700 гг. н.э.) (см. также [12]). При этом глубина реконструированных минимумов СА меняется в зависимости от температурного коэффициента: если реконструированное значение $\varphi(t)$ при $k = 0$ во время минимума Оорта падало до 80 МВ, то при $k = 0.02 \text{ K}^{-1}$ оно могло спадать практически до нуля, что имеет место и во время минимумов Шпёрера и Маундера.

Можно отметить и более ранние глобальные минимумы СА, например, в ≈ 750 г. до н.э., что было отмечено и в работе [13]. Отмеченные минимумы СА присутствуют на рис. 2В при $k = 0$ и при $k = 0.02\text{K}^{-1}$, хотя и имеют разную глубину. Однако существуют и временные участки (535–415 гг. до н.э., 125–260 гг. н.э., 635–730 гг. н.э., 770–900 гг. н.э.) на которых $\varphi(t)$ изменяются в противофазе. Наблюдаемые пики $\Delta^{14}\text{C}$ в эти периоды могут быть результатом мощных солнечных вспышек или всплесков ГКЛ, а не результатом модуляции ГКЛ межпланетным магнитным полем. Здесь необходимо отметить, что в работе [14] сделан вывод о событии 775 г.н.э. как результат мощной солнечной вспышки.

Рис. 2. А – Реконструкции скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C $Q(t)$ для двух значений температурный коэффициент k ; Б – изменение дипольного магнитного момента Земли [11]; В – реконструкция гелиосферного модуляционного потенциала.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 18-02-00583 и 19-02-00088.

Литература

1. Schwander J. In *Glaciers and Ice Sheets*. (H. Oeschger, C.C. Langway Jr., Ed.), pp. 53-67. 1989. John Wiley, New York.
2. Reimer P.J. et al. // *Radiocarbon*, 2013, V. 55 (4). P. 1869.
4. Monnin E. et al. // *Science*, 2001, V. 291. P. 112.
5. Marcott S.A. et al. // *Science*, 2013. V. 339, P. 1198.
6. Kobashi T. et al. // *Geophys. Res. Lett.*, 2011. V. 38. L21501.
7. Kudryavtsev I.V. et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, V. 56 (8). P. 998.
8. Kudryavtsev I.V. et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, V. 58 (7). P. 925.
9. Kovaltsov G.A. et al. // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2012, V. 337. P. 114.
10. Poluianov S.V. et al. // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2016, V.121. P. 8125.
11. Knudsen M.F. et al. // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, V. 272. P. 219.
12. Usoskin I.G. et al. // *A&A*, 2007, V. 471. P. 301
13. Дергачев В.А. и др. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2018», 2018, с.149.
14. Miyake F. et al. // *Radiocarbon*, 2017, V.59(2), P. 315.