СКОРОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ КОСМОГЕННОГО ИЗОТОПА ^{14}C , ГЕЛИОСФЕРНЫЙ МОДУЛЯЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ И ВАРИАЦИИ КЛИМАТА ЗЕМЛИ В СРЕДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

Кудрявцев И.В.^{1,2}, Дергачев В.А.¹

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

RADIOCARBON PRODUCTION RATE, HELIOSPHERIC MODULATION POTENTIAL AND CLIMATE VARIATIONS DURING THE MIDDLE HOLOCENE

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

¹*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

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

Results of reconstruction of the radiocarbon production rate and of the heliospheric modulation potential based on the radiocarbon data during 8000-0 BC are presented. The reconstruction takes into account change of the global temperature, increase of CO₂ concentration in the Earth's atmosphere and change of vegetation. The obtained reconstruction reflects the variations in activity of the Sun. It is shown that in the 5000-3000 BC time interval the solar activity could be increased with a sharp drop of about 3000 BC, which corresponded to a decrease in the global surface temperature.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-185-188

Данные по содержанию космогенного изотопа ^{14}C в годовых кольцах деревьев позволяют реконструировать скорость образования этого изотопа в атмосфере Земли под действием космических лучей в прошлом. Это позволяет изучать историю активности Солнца. В научной литературе традиционно ограничивались проведением реконструкций солнечной активности на основе радиоуглеродных данных только для Голоцена. В этих реконструкциях не учитываются изменения в углеродной обменной системе, связанные с изменением земного климата. Однако в работе [1] было показано, что изменение климата в течение Малого Ледникового Периода влияет на результаты реконструкций и это необходимо учитывать при расчетах скорости генерации изотопа ^{14}C в атмосфере. В работах [2, 3] была построена модель, описывающая изменение радиоуглеродной обменной системы при изменении климата после последнего глобального оледенения, позволяющая реконструировать скорость генерации ^{14}C [4] и гелиосферный модуляционный потенциал (ГМП) [5] на временном интервале 17000–5000 лет до нашей эры (н.э.). Данный временной интервал характеризуется окончанием последнего ледникового периода и переходом к Голоцену – достаточно теплomu периоду, который длится до настоящего времени. При переходе от Ледникового Периода к Голоцену, как известно, происходили

увеличения глобальной температуры [6, 7] и концентрации углекислого газа в атмосфере Земли [8]. Учет влияния этих изменений на скорость перехода радиоуглерода из верхнего слоя океана в атмосферу и из атмосферы в биосферу позволил реконструировать скорость генерации изотопа ^{14}C в земной атмосфере [4] и ГМП [5]. Для этого использовалась линейная зависимость от температуры скорости перехода радиоуглерода из верхнего слоя океана в атмосферу:

$$\lambda_{mOa} = (1 + k_1 \cdot \Delta T) \lambda_{mOa}^0 \quad (1)$$

где ΔT – аномалии глобальной температуры [6, 7]. Величина коэффициента k_1 находится в интервале $(0.04\text{--}0.05)\text{K}^{-1}$.

В качестве начального момента времени t_1 был выбран 17000 год до н.э. Для скорости перехода радиоуглерода из атмосферы в биосферу более сложная зависимость:

$$\begin{aligned} \lambda_{ab} &= \lambda_{ab}^I \text{ при } t_1 < t < t_2 \\ \lambda_{ab} &= \lambda_{ab}^I (1 + k_2 (T(t) - T(t_1)) \sqrt{t - t_2}) \text{ при } t_2 < t < t_3 \end{aligned} \quad (2)$$

где t_2 – момент времени, в который начинает изменяться скорость перехода ^{14}C из атмосферы в биосферу, это изменение характеризуется коэффициентом k_2 и связано с изменением растительности. В расчетах было принято что $t_2 = 8300$ г до н.э., $t_3 = 5000$ г до н.э. При этом значение λ_{ab}^I было принято на 15% меньше значения для середины 20 века нашей эры, приведено в работе [9] (см. также [1]). Величина k_2 может составлять $\approx 0.01\text{--}0.02 \text{ K}^{-1}$. Расчеты проводились согласно 5-ти резервуарной модели радиоуглеродной обменной системы.

В работах [4,5] рассмотрение ограничивалось 5000 г. до н.э. Однако в течение Голоцена также происходили климатические изменения, в частности, менялась глобальная температура, изменялось содержание углекислого газа в атмосфере Земли. Поэтому при изучении активности Солнца на основе радиоуглеродных данных в Среднем Голоцене необходимо учесть происходившие тогда климатические изменения – самым глобальным из них являлось (сопровождалось) превращение Сахары в пустыню. Такие климатические изменения не могло не сказаться на обмене углеродом между атмосферой и биосферой. Поэтому будем считать, что с момента времени t_2 до некоторого момента t_3 скорость перехода $\lambda_{ab}(t)$ меняется согласно (2), а с момента времени t_3 зависимость $\lambda_{ab}(t)$ становится линейной до момента времени t_4 , в который λ_{ab} принимает современное значение и больше не изменяется. На рисунке 1А приведены расчеты скорости генерации Q изотопа ^{14}C в земной атмосфере при $t_3 = 5000$ г. до н.э. для $t_4 = 3000$ г. до н.э. Другие параметры аналогичны [5]. На рисунке отчетливо видно уменьшение Q на временном интервале $\approx 5000\text{--}3000$ гг. до н.э., ско-

рость образования изотопов ^{14}C могла опускаться до $1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Максимальное значение на интервале 8000–0 BC может превышать $2.5 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. При $t_4 = 1000$ г. до н.э. (рисунок 1Б) такое уменьшение слабее и больше растянуто во времени.

Рис. 1. Реконструированные значения скорости генерации изотопа ^{14}C .

На рисунке 2 приведены результаты расчетов ГМП для рассмотренных выше скоростей генерации изотопа ^{14}C . ГМП, как известно, отражает вариации активности Солнца. Метод расчета гелиосферного модуляционного потенциала $\phi(t)$ хорошо известен и подробно изложен в работах [8, 9]. Расчеты проводились с использованием приведенного в работе [13] дипольного магнитного момента

Рис. 2. Реконструкции ГМП при $t_4 = -3000$ г. (А) и $t_4 = -1000$ г. (Б).

На рисунке 2 видно, что при $t_4 = -3000$ г. реконструированные значения ГМП на временном интервале 5000–3000 гг. до н.э. находятся на достаточно высоком уровне и даже превышают 1ГВ, что свидетельствует о

высокой активности Солнца в этот период. При $t_4 = -1000$ г. до н.э. ГМП растёт в этот период меньше, но само увеличение продолжается до ~1500 гг. до н.э. На рисунке 3 приведены данные об изменении глобальной температуры Земли в это время [14], отчетливо выделяется её спад после 3000 г. до н.э., что может быть результатом уменьшения активности Солнца. Кроме этого на графике присутствует пик около 5000 г. до н.э.

Рис. 3. Изменение глобальной температуры [14].

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

Литература

1. Kudryavtsev I.V. et al. // *Geochronometria*, 2014, V. 41, No. 3, P. 216.
2. Kudryavtsev I.V. et al. // *Geomag. and Aeronomy*, 2016, V. 56, No.7, P. 858.
3. Кудрявцев И.В., Дергачев В.А. // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016», 10–14 октября 2016 г., ГАО РАН, СПб, P. 179.
4. Kudryavtsev I.V. et al. // *Geomag. and Aeronomy*, 2018, V. 58, No. 7, P. 925.
5. Kudryavtsev I.V. and Dergachev V.A. // *Geomag. and Aeronomy*, 2019. V. 59, No. 8, P.1099.
6. Marcott S.A., Shakun J.D. // *Pages Magazine*, 2015, V. 23(1), p. 28.
7. Shakun J.D. et al. // *Nature*, 2012, V. 484, P. 49.
8. Monnin E. et al. // *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, V. 224, P. 45.
9. Дорман Л.И. // Труды 6 Всесоюзного совещания по проблеме «Астрофизические явления и радиоуглерод». Тбилиси 13–15 октября 1976 г. Тбилиси, 1978. С. 49.
10. Reimer P.J. et al. // *Radiocarbon*, 2013, V. 55(4), P. 1869.
11. Kovaltsov G.A. et al. // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2012, V. 337, P. 114.
12. Poluianov S.V. et al. // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016, V. 121, P. 8125.
13. Knudsen M.F. et al. // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, V. 272, P. 219.
14. Marcott S.A. et al. // *Science*, 2013, V. 339, p. 1198.