**РАДИОУГЛЕРОДНЫЕ ДАННЫЕ ОБ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА
И ВАРИАЦИЯХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ
В ЭПОХУ МАЕНДОРВСКОГО – АЛЛЕРЁДСКОГО ПОТЕПЛЕНИЙ
(~ 13000-11000 ГГ. ДО Н.Э.)**

Дергачев В.А.¹, Кудрявцев И.В.^{1,2}

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

²ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

**RADIOCARBON EVIDENCE OF THE CLIMATIC CHANGES AND
THE SOLAR ACTIVITY VARIATIONS DURING THE MEIENDORF –
ALLEROD INTERSTADIAL EPOCH (~ 13000-11000 B.C.)**

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

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

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

A relative alteration of radiocarbon in the Earth atmosphere during 13000–10500 BC is considered. The results of the reconstruction of the heliospheric modulation potential are presented. It is shown, that some the global climatic changes may be caused by the changes of solar activity.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-145-148

Данные по содержанию космогенного изотопа ^{14}C в земной атмосфере позволяют, как известно, изучать вариации солнечной активности в прошлые эпохи. Однако изменения земного климата приводят к искажению информации о солнечной активности. В данной работе нами рассматривается временной интервал с конца 13 тысячелетия до нашей эры (н.э.) до середины 11 тысячелетия до н.э. На этот временной интервал, как известно, приходилось несколько периодов изменения климата Земли (см., например, [1]). Так, с 12500 года до н.э. до 11850 год до н.э. происходило Майендорфское потепление, которое сменилось Древнейшим Дриасом ($\approx 11850\text{--}11720$ гг. до н. э). Последний период характеризовался более холодным климатом, после чего наступило очередное потепление Бёллингское (до ≈ 11.6 тысяч лет до н.э.). На смену этому тёплому периоду снова пришёл более холодный и сухой период (Древний Дриас), продолжавшийся около 200 лет. После этого наступило Аллерёдское потепление, длившееся около 700 лет. Рассмотрим детально этот временной интервал.

На рисунке 1А представлено изменение относительного содержания радиоуглерода ($\Delta^{14}\text{C}$) в атмосфере Земли с 13000 до 10500 лет до н.э. [2]. На рисунке видно уменьшение величины $\Delta^{14}\text{C}$ до середины 13 тысячелетия до н.э., после чего происходит колебания значений $\Delta^{14}\text{C}$ на величину около $\pm 1\%$ вплоть до 10800 года до н. э. В это же время наблюдался рост кон-

центрации углекислого газа в атмосфере с последующей стабилизацией в 12 тысячелетии до н. э. (рисунок 1Б). Изменение абсолютного содержания радиоуглерода в атмосфере (рисунок 1В), может быть рассчитано исходя из следующего выражения (см., например, [3])

$$\frac{Na(t)}{Na(t_o)} = \frac{CO_2(t)}{CO_2(t_o)} (1 + \Delta^{14}C(t)/100) / (1 + \Delta^{14}C(t_o)/100) , \quad (1)$$

где, t – время; $CO_2(t)$ – концентрации углекислого газа в атмосфере; значение $\Delta^{14}C$ выражено в процентах; t_o – некоторый произвольный момент времени. В качестве момента времени t_o в настоящей работе принят 13000 год до н.э.

Рис. 1. А – изменение $\Delta^{14}C$ [2]; Б – изменение концентрации CO_2 в атмосфере Земли [4]; В – вариации содержания изотопа ^{14}C в земной атмосфере; Г – дипольный магнитный момент Земли [5].

На рисунке 1Г представлено изменение дипольного магнитного момента Земли [5], которое используется нами при расчете гелиосферного модуляционного потенциала $\phi(t)$. Вариации этого параметра отражают из-

менение солнечной активности. При увеличении солнечной активности значение $\varphi(t)$ увеличивается, а при уменьшении – уменьшается.

Способ нахождения потенциала $\varphi(t)$ хорошо известен, он подробно изложен в работах [6, 7]. Нахождение $\varphi(t)$ сводится к решению следующего уравнения для различных моментов времени t :

$$Q(t) = \sum_{i=1}^2 Y_i(E) J_i(E, \varphi(t)) (1 - f(E, M(t))) dE, \quad (2)$$

где $Q(t)$ – скорость генерации космогенного изотопа ^{14}C в земной атмосфере; функции Y_i описывают образование изотопов ^{14}C в атмосфере под действием протонов и α -частиц первичных космических лучей; J_i – спектр протонов и α -частиц первичных космических лучей; функция f – описывает влияние геомагнитного поля на проникновение частиц ГКЛ в атмосферу Земли, E – кинетическая энергия частиц ГКЛ, приходящаяся на один нуклон; $M(t)$ – дипольный магнитный момент Земли. Функциональные зависимости для функций J_i и f , а также значения функций Y_i приведены в работе [6, 7].

Как видно из выражения (2), для нахождения $\varphi(t)$ необходимо задать функцию $Q(t)$. В настоящей работе мы будем следовать работам [8–10] при нахождении $Q(t)$ и выберем значение температурного коэффициента k_L , описанного в цитируемых работах, равным 0,045. Результаты реконструкции $\varphi(t)$ представлены на рисунке 2.

Рис. 2. Реконструированные значения гелиосферного модуляционного потенциала.

Абсолютный максимум модуляционного потенциала (а, следовательно, и максимума солнечной активности) на данном временном интервале

достигается в ≈ 12380 году до н.э., что соответствует эпохе Майендорвского потепления (≈ 12500 – 11850 гг. до н.э.). На временной интервал ≈ 11850 – 11720 гг. до н.э. приходится период Древнейшего Дриаса – период с более холодным климатом. Этот временной интервал, как видно из рисунка 2, соответствует минимуму $\varphi(t)$ (и, следовательно, минимуму солнечной активности). После этого наступило Бёллингское потепление и, соответственно, рост $\varphi(t)$. Последующий период более холодного климата (Древний Дриас) закончился, как известно, в середине 12-го тысячелетия до н.э., этот период также находит своё отражение на рисунке 2. Последующее потепление (Аллерёдское), длилось около 700 лет и потенциал $\varphi(t)$ также испытывал колебания. Минимум $\varphi(t) \approx 10700$ года до н.э. соответствует окончанию Аллерёдского потепления. Таким образом, результаты проведенной работы показывают, что в истории Земли могли быть периоды, когда изменения климата могли быть вызваны изменением активности Солнца. Однако для подтверждения данного вывода необходимо требуются дополнительные исследования.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ 16-02-00090 и 18-02-00583.

Литература

1. *Litt T. et al.* // *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 11, P.1233.
2. *Reimer P.J. et al.* // *Radiocarbon*, 2013, V. 55(4), p. 1869.
3. *Kuleshova A.I et al.* // *Geomag. and Aeronomy*. 2015, V. 55, No. 8.
4. *Monnin E., et al.* // *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, V. 224, p. 45.
5. *Knudsen M.F. et al.* // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, V. 272, P. 219.
6. *Kovaltsov G.A. et al.* // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2012, V. 337, P. 114.
7. *Polunianov S.V. et al.* // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2016, V. 121, P. 8125.
8. *Kudryavtsev I.V. et al.* // *Geomag. and Aeronomy*, 2016, V. 56, No.7, P. 858.
9. *Кудрявцев И.В. и др.* / Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2017», 9–13 октября 2017 г., ГАО РАН, СПб, с. 207.
10. *Кудрявцев И.В., Дергачев В.А.* / Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2017», 9–13 октября 2017 г., ГАО РАН, СПб, с. 211.