**РЕКОНСТРУКЦИЯ ГЕЛИОСФЕРНОГО МОДУЛЯЦИОННОГО
ПОТЕНЦИАЛА НА ОСНОВЕ РАДИОУГЛЕРОДНЫХ ДАННЫХ
В ЭПОХУ ОКОНЧАНИЯ ПОСЛЕДНЕГО ЛЕДНИКОВОГО
ПЕРИОДА, РАННЕГО И СРЕДНЕГО ГОЛОЦЕНА**

Кудрявцев И.В., Дергачев В.А.

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

**THE RECONSTRUCTION OF THE HELIOSPHERIC MODULATION
POTENTIAL BASED ON THE RADIOCARBON DATA
IN DEGLACIATION, EARLY AND MIDDLE HOLOCENE**

Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A.

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

Results of reconstruction of the heliospheric modulation potential based on the radiocarbon data in the Deglaciation, Early and Middle Holocene are presented. The obtained reconstruction taking into account change of the global temperature, increase of CO₂ concentration in the Earth's atmosphere and change of vegetation in the Early Holocene. The reconstruction reflects the variations in solar activity. It is necessary to note that the maximum of the heliospheric modulation potential at 12380 BC can be caused by increased solar activity.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-251-254

Хорошо известно, что данные по содержанию космогенного изотопа ¹⁴C в атмосфере Земли в прошлые столетия и тысячелетия (см., например, [1] и рисунок 1А) часто используются для изучения изменений солнечной активности в до-инструментальную эпоху. Особый интерес представляет временной интервал с 17–18 тысяч лет до нашей эры (н.э.) и до начала Голоцена (~10 тысяч лет до н.э.). Этот временной интервал характеризуется окончанием последнего глобального оледенения и переходом к достаточно теплomu периоду, который длится до наших дней и называется Голоценом. В это же время наблюдалось и увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере Земли (рисунок 1Б). В 12–11 тысячелетиях до н.э. рост концентрации CO₂ в атмосфере остановился, даже происходило некоторое его уменьшение. В этот промежуток времени происходило увеличение глобальной температуры (рисунок 1В) приблизительно до 11500 года до н.э., после чего наступил резкий её спад [3, 4]. Начиная с середины 11 тысячелетия до н.э. снова начался рост глобальной температуры. Такие климатические изменения нашли свое отражение в радиоуглеродных данных. На рисунке 1А видно, что относительное содержание ¹⁴C в атмосфере ($\Delta^{14}\text{C}$) падало больше чем на 30%, что очевидно связано с перераспределением радиоуглерода между природными резервуарами. Поэтому для изучения вариаций солнечной активности в прошлом необходимо учесть влияние

климатических изменений на радиоуглеродные данные (см., например [5]). В работе [6] представлена реконструкция скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C в атмосфере Земли $Q(t)$ с учетом климатических изменений для временного интервала 17000–5000 лет до нашей эры (BC).

Рис. 1. А – Вариации $\Delta^{14}\text{C}$ в атмосфере Земли [1]; Б – Изменение концентрации углекислого газа в земной атмосфере [2]; В – Изменение глобальной приземной температуры [3, 4]; Г – дипольный магнитный момент Земли [7].

Заметим, что вариации скорости генерации изотопа ^{14}C в земной атмосфере отражают не только изменение солнечной активности (и, следовательно, межпланетного магнитного поля), но и изменение магнитного поля Земли. Поэтому необходимо перейти от рассмотрения скорости генерации изотопа ^{14}C к рассмотрению вариаций гелиосферного модуляционного потенциала $\phi(t)$, который уже непосредственно отражает изменение солнечной активности. Метод расчета модуляционного потенциала $\phi(t)$ хорошо известен и подробно изложен в работах [8, 9]. Нахождение $\phi(t)$ сводится к решению уравнения для различных моментов времени:

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

где t – время, $Q(t)$ – скорость генерации изотопа ^{14}C в земной атмосфере; функции Y_i описывают образование изотопов ^{14}C в атмосфере; 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 приложении к работе [8]. Значения для магнитного момента $M(t)$ опубликованы в работе [9].

Для нахождения $\varphi(t)$ необходимо также задать функцию $Q(t)$. В настоящей работе будем следовать работам [5, 6, 10] и использовать полученные в ней параметры пятирезервуарной модели, используемые при нахождении $Q(t)$. При этом учитывается изменение скорости перехода радиоуглерода из верхнего слоя океана в атмосферу при изменении глобальной температуры, а также изменение скорости перехода этого изотопа из атмосферы в биосферу. В расчетах использовались следующие значения температурных коэффициентов $k_1 = 0.045$, $k_2 = 0.011$ (подробнее см. [5, 10]) и содержанию радиоуглерода в атмосфере $6.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ в 17000 году до н.э. Результаты реконструкции $\varphi(t)$ представлены на рисунке 2.

Рис. 2. Гелиосферный модуляционный потенциал, реконструированный на основе данных по содержанию изотопа ^{14}C в земной атмосфере.

Среди присутствующих на графике многочисленных минимумов и максимумов следует выделить минимум потенциала $\varphi(t)$ в ≈ 13370 году до н.э. и максимум, приходящийся на ≈ 12380 год до н.э. За этот промежуток времени значение гелиосферного модуляционного потенциала выросло более чем на 1 ГВ и достигло экстремально большого значения. Такое повышение величины модуляционного потенциала может отражать повышенный уровень солнечной активности, длившийся ~ 1 тысячу лет.

Здесь необходимо отметить, что приблизительно в это же время на Земле наблюдалось достаточное длительное потепление (рисунок 1В), которое сменилось похолоданием в ≈ 11500 году до н.э. с последующим потеплением и переходом к Голоцену. Возникает вопрос: связано ли данное потепление с повышенным уровнем активности Солнца, о чем свидетельствуют радиоуглеродные данные, или это потепление вызвано другими причинами?

Литература

1. Reimer P.J. et al. // Radiocarbon, 2013, V. 55(4), p. 1869.
2. Monnin E., et al. // Earth and Planetary Science Letters, 2004, V. 224, p. 45.
3. Marcott S.A., Shakun J.D. // Pages Magazine, 2015, V. 23(1), p. 28.
4. Marcott S.A. et al. // Science, 2013, V. 339, p. 1198.
5. Kudryavtsev I.V. et al. // Geomag. and Aeronomy, 2016, V. 56, No. 7, P. 858.
6. 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.
7. Knudsen M.F. et al. // Earth Planet. Sci. Lett., 2008, V. 272, P. 219.
8. Kovaltsov G.A. et al. // Earth Planet. Sci. Lett., 2012, V. 337, P. 114.
9. Polunin S.V. et al. // J. Geophys. Res. Atmos., 2016, V. 121, P. 8125.
10. 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, с. 179.