**СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В 1-М ТЫСЯЧЕЛЕТИИ
ДО НАШЕЙ ЭРЫ – 1-М ТЫСЯЧЕЛЕТИИ НАШЕЙ ЭРЫ
НА ОСНОВЕ РАДИОУГЛЕРОДНЫХ ДАННЫХ**

Дергачев В.А.¹, Кудрявцев И.В.^{1,2}, Наговицын Ю.А.²

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

²ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

**SOLAR ACTIVITY FROM 1000 YEAR BC TILL 1000 YEAR AD
ON RADIOCARBON DATA**

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

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

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

This paper presents the reconstruction of production rate of the cosmogenic isotope ^{14}C and heliospheric modulating potential in the time interval from 1000 BC to the end of the first millennium AD. As is known, significant climatic changes took place during this period, which was accompanied by a change in the thickness of the ice cover, in particular in Iceland and Norway. At the same time, a trend was observed in radiocarbon data. As a result of the simulation, it was found that the maximum value of the heliospheric modulating potential $\phi(t)$ at this time interval reached about 500 BC (≈ 400 MV). In the first millennium AD, the maximum values of $\phi(t)$ were slightly smaller. In the second half of the first millennium AD, increased values of the modulating potential were observed, which correspond to the transition to a "small climatic optimum".

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-149-152

Временной интервал с конца 1-го тысячелетия до нашей эры (н.э.) до конца 1-го тысячелетия нашей эры интересен тем, что в этом интервале отмечаются существенные климатические изменения. Так, в работе [1] анализируются данные по изменению толщины ледников в Исландии и Норвегии. Оказывается, что до ≈ 1000 –800 гг. до н.э. происходило таяние ледников, которое затем сменилось ростом толщины ледников, что, по-видимому, связано с похолоданием. В конце 1-го тысячелетия н.э. наступило потепление («малый климатический оптимум»). Такие колебания климата могли отразиться в радиоуглеродных данных этого интервала, на основе которых производится реконструкция скорости генерации радиоуглерода в атмосфере Земли и солнечной активности (СА) в доинструментальную эпоху.

В работе приводятся результаты реконструкций скорости генерации радиоуглерода и гелиосферного модуляционного потенциала (ГМП) для данного временного интервала. Реконструкции скорости генерации изотопа ^{14}C проводятся на основе пятирезервуарной модели с учетом изменения климатических параметров. Однако радиоуглеродный «параметр» отража-

ет не только изменение интенсивности космических лучей, но и изменение геомагнитного поля. Поэтому для изучения вариаций СА осуществляется переход от скорости генерации в ^{14}C земной атмосфере к рассмотрению ГМП, которые уже непосредственно отражают вариации СА.

На рисунке 1А приведено относительное содержание радиоуглерода в земной атмосфере ($\Delta^{14}\text{C}$) [2] с конца второго тысячелетия до нашей эры. Как видно из рисунка, значение $\Delta^{14}\text{C}$ регулярно уменьшается до ≈ 500 года нашей эры. Как было указано выше, величина $\Delta^{14}\text{C}$ определяется не только интенсивностью космических лучей в межпланетном пространстве, но и вариациями магнитного поля Земли и климатическими изменениями. Магнитное поле Земли препятствует проникновению заряженных частиц в атмосферу Земли, а вариации климата приводят к перераспределению углерода между природными резервуарами. Здесь стоит отметить, что в это же самое время происходит некоторое уменьшение глобальной приземной температуры [3] (рисунок 1Б). При этом, приблизительно в 500 году н.э. глобальная температура начала расти, и последующий её спад ознаменовал переход к малому ледниковому периоду. Магнитное поле Земли тоже

Рис. 1. А – относительное содержание радиоуглерода в земной атмосфере ($\Delta^{14}\text{C}$) [2]; Б – аномалия глобальной температуры [3]; В – дипольный магнитный момент Земли [4]; Г – содержание углекислого газа в атмосфере Земли [5].

изменялось в это время, причем согласно работе [4], локальный минимум приходился на начало нашей эры (рисунок 1В). Некоторые изменения происходили и с содержанием углекислого газа в атмосфере Земли (рисунок 1Г, [5]). Поэтому для изучения вариаций солнечной активности в этот период необходимо учесть все перечисленные факторы. Исходя из приведенных данных на рисунке 1, будем полагать, что радиоуглеродная система находилась в состоянии близком к равновесному в 1800 году до н.э., и проведём расчеты, начиная с этого момента времени.

Рис. 2. А – вариации содержания изотопа ^{14}C в атмосфере относительно 1800 ВС; Б – скорость генерации космогенного изотопа ^{14}C ; В – гелиосферный модуляционный потенциал.

На рисунке 2А представлены вариации абсолютного содержания радиоуглерода в атмосфере Земли, рассчитанные аналогично работам [6–8] с учетом изменения концентрации углекислого газа в атмосфере Земли (см. также работу [9]). Расчет скорости генерации изотопа ^{14}C ($Q(t)$) проводился согласно работам [6–8, 10] с учётом влияния изменения температуры на скорость перехода между верхним слоем океана и атмосферой с температурным коэффициентом 0,1. Начальное содержание изотопа ^{14}C в земной атмосфере было определено как $6,8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Полученные значения скорости генерации изотопа ^{14}C (рисунок 2Б) несколько превышают значения

указанные в работе [11], что может быть вызвано используемой моделью обменной системы и используемыми данными для геомагнитного поля.

На рисунке 2В приведены результаты расчета гелиосферного модуляционного потенциала $\phi(t)$, согласно методу, изложенному в работе [11]. При этом использовались обновленные значения функций выхода, приведенные в работе [12] для различных высот в атмосфере. Из полученных значений гелиосферного модуляционного потенциала следует, что самых больших значений на рассматриваемом интервале в 2 тысячи лет потенциал $\phi(t)$ достигал около 500 года до н.э. (≈ 410 МВ). В первом тысячелетии нашей эры максимальные значения $\phi(t)$ были несколько меньше (≈ 390 МВ) в середине первого века.

В заключении отметим, что в середине 1-го тысячелетия до нашей эры происходило увеличение модуляционного потенциала, а, следовательно, и солнечной активности, с последующим её кратковременным уменьшением. Во второй половине первого тысячелетия нашей эры наблюдались повышенные значения модуляционного потенциала (и, следовательно, солнечной активности), что соответствует переходу к «малому климатическому оптимуму».

Работа была частично поддержана грантами РФФИ 16-02-00090 и 18-02-00

Литература

1. Борисенко Е.П., В.М. Пасецкий. Тысячелетняя летопись необычных явлений природы. – М.: Мысль, 1988.
2. Reimer P.J. et al. // Radiocarbon, 2013, V. 55(4), p. 1869.
3. Marcott S. A. et al. // Science, 2013, **339**, p. 1198.
4. Knudsen M.F. et al. // Earth Planet. Sci. Lett., 2008, V. 272, p. 219.
5. Monnin E., et al. // Earth and Planetary Science Letters, 2004, V. 224, p. 45.
6. Kudryavtsev I.V. et al. // Geochronometria, 2014, V. 41(3), p. 216.
7. Kuleshova A.I. et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, V. 55(8), p. 1071.
8. Kudryavtsev I.V. et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2016, V. 56(8), p. 998.
9. R. Roth and F. Joos. // Clim. Past, 2013, V. 9, p. P1879.
10. 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.
11. Usoskin I.G. et al. // A&A, 2014, 562, L10.
12. Kovaltsov G.A. et al. // Earth Planet. Sci. Lett., 2012, V. 337, p. 114.
13. Poluianov S.V. et al. // J. Geophys. Res. Atmos., 2016, V. 121, P. 8125.