**РАДИОУГЛЕРОДНЫЕ ДАННЫЕ С КОНЦА 18 ВЕКА
КАК ОТРАЖЕНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ,
ЕСТЕСТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
И АНТРОПОГЕННОЙ АКТИВНОСТИ**

**Ларионова А.И.¹, Дергачев В.А.², Кудрявцев И.В.^{2,1},
Наговицын Ю.А.^{1,3}, Огурцов М.Г.^{2,1}**

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

³ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

**THE RADIOCARBON DATA FROM THE END OF 18 CENTURY AS
REFLECTION OF SOLAR ACTIVITY VARIATIONS, NATURAL
CLIMATIC CHANGES AND ANTROPOGENIC ACTIVITY**

**Larionova A.I.¹, Dergachev V.A.², Koudriavtsev I.V.^{2,1},
Nagovitsyn Y.A.¹, Ogurtsov M.G.^{2,1}**

¹Central Astronomical Observatory of RAS, St. Petersburg, Russia

²Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

³State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

The data on the cosmogenic isotope ^{14}C abundance in natural archives allow us to study solar activity (SA) in the past centuries and millennia. However, the abundance of the ^{14}C isotope in natural archives is affected not only by intensity of the galactic cosmic rays (GCRs) coming to the Earth, modulating by an interplanetary magnetic field and changing as consistent with SA changes. Changes in the geomagnetic field and climatic changes which lead to the redistribution of radiocarbon between natural reservoirs have a significant effect. In the 19th century anthropogenic activity was added to the natural factors that should be taken into account when using radiocarbon data. The paper presents the results of reconstruction of the production rate of the ^{14}C isotope due to GCR taking into account the factors noted above. It is shown that redistribution of radiocarbon between the deep layers of the ocean, the surface layers and the atmosphere starts since the second quarter of the 19th century. Most likely this process has a natural character.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-277-280

В работах [1–4] были предложены реконструкции скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C в земной атмосфере, гелиосферного модуляционного потенциала (ГМП) и чисел Вольфа во втором тысячелетии нашей эры до середины 19 века с учетом изменения климата. Как известно, в этот период наблюдались глобальные минимумы солнечной активности (СА) – минимумы Шперера, Маундера, Дальтона. Во втором тысячелетии нашей эры происходили изменения земного климата, наблюдался Малый ледниковый период (МЛП), в течение которого изменялись глобальная температура и концентрация углекислого газа в атмосфере (рис. 1).

Рис. 1. А – кривые 1,2 – аномалии глобальной температуры согласно работам [5, 6];
Б – изменение концентрации CO_2 в земной атмосфере [7].

В работах [1–4] было показано, что учет климатических изменений влияет на результаты реконструкций скорости генерации изотопа ^{14}C в атмосфере, ГМП и чисел Вольфа. В цитируемых работах подразумевалось, что уменьшение концентрации CO_2 в атмосфере вызвано усилением поглощения этого газа океаном при уменьшении температуры последнего. При расчетах учитывались изменения скорости перехода радиоуглерода из верхнего (деятельного) слоя океана в атмосферу при изменении глобальной температуры. В результате этого оказывается, что более длительный минимум Маундера мог быть сравнимым по глубине с минимумом Дальтона. Здесь необходимо отметить, что пренебрежение изменением глобальной температуры во время МЛП приводит к другому результату реконструкции, а именно, что минимум Маундера был ниже минимума Дальтона (см., например [8]).

В настоящей работе основное внимание мы уделяем рассмотрению временного интервала с конца 18 века по середину 20-го. Как известно, в 19 веке радиоуглеродные данные начинают отражать не только вариации космических лучей (КЛ), активности Солнца и климатические изменения, но и антропогенную деятельность. В результате сжигания угля, нефти и природного газа происходит выброс в атмосферу углекислого газа, не содержащего изотопа ^{14}C , т.е. происходит уменьшение величины $\Delta^{14}\text{C}$ (рис 2.А), которое известно как Зюсс-эффект. Причина этого в том, что $\Delta^{14}\text{C}$ описывает отношение концентраций изотопов ^{14}C и ^{12}C , изменяющегося под антропогенным воздействием.

Согласно определению $\Delta^{14}\text{C}$, вариации концентрации изотопа ^{14}C в атмосфере $N_a(t)$ могут быть выражены как (см., например [2, 3]):

$$\frac{N_a(t)}{N_a(t_0)} = \frac{\text{CO}_2(t)}{\text{CO}_2(t_0)} (1 + \Delta^{14}\text{C}(t)/100) / (1 + \Delta^{14}\text{C}(t_0)/100),$$

где $\Delta^{14}\text{C}$ – относительное содержание изотопа ^{14}C в атмосфере в процентах, t_0 – произвольный момент времени.

Рис. 2. А – $\Delta^{14}\text{C}$ согласно [9]; Б – вариации содержания изотопа ^{14}C в атмосфере.

На рис. 2Б показаны вариации $N_a(t)$. Локальные максимумы содержания изотопа ^{14}C , прослеживаемые на рисунке в 1330, 1530, 1715, 1830 гг., приходятся на минимумы СА Вольфа, Шперера, Маундера и Дальтона соответственно. Обратим внимание на тот факт, что после 1840 года начинается регулярный рост концентрации ^{14}C в атмосфере (см. также [10]). Важно отметить, что этот рост происходит синхронно с ростом концентрации углекислого газа. Глобальная температура также растет в этот период. Как объяснить этот факт? Очевидно, что происходит поступление в атмосферу CO_2 , который содержит изотопы ^{14}C из других природных резервуаров. Таким резервуаром может быть глубокий океан, в котором «запасена» подавляющая часть ^{14}C , находящегося на Земле.

Проведем реконструкцию скорости генерации изотопа ^{14}C на основе пятирезервуарной модели углеродной обменной системы. Аналогично работам [1–4], для скорости перехода ^{14}C из верхнего слоя океана в атмосферу λ_{mOa} будем использовать выражение $\lambda_{mOa} = (1 + k_1 \cdot \Delta T) \lambda_{mOa}^0$, где k_1 – температурный коэффициент, ΔT – аномалии глобальной температуры. Для скорости перехода радиоуглерода из глубокого слоя океана в верхний будем использовать выражение $\lambda_{dOmO} = (1 + k \cdot (\Delta T - \Delta T(t'))) \lambda_{dOmO}^0$, где температурный коэффициент $k = 0$ для $t < t^*$ и $k = k_2$ для $t \geq t^*$. Таким образом, будем предполагать, что климатические изменения не затрагивали глубокий океан до некоторого момента времени t^* , но с момента t^* началось увеличение температуры глубокого океана и процесс выхода CO_2 из него.

Используемые при расчетах температурные реконструкции были усреднены по 30-ти годам. На рис. 3А, кривая 1, приведены результаты реконструкции скорости образования радиоуглерода $Q(t)$, полученные при использовании температурного ряда Crowley [6] при $k_1 = 0.1\text{K}^{-1}$ и $k_2 = 0$. О выборе значения коэффициента k_1 подробнее сказано в работах [1, 2]. В этом случае восстановленные значения $Q(t)$ сильно растут после 1850 г., что не может быть объяснено без дополнительного притока радиоуглерода в атмосферу. Источником этого радиоуглерода может быть глубокий оке-

ан. Кривая 2 показывает восстановленные значения $Q(t)$ при $k_1 = k_2 = 0.1 \text{ K}^{-1}$. В этом случае расчетные значения $Q(t)$ в первой половине 20-го века становятся меньше 2. Подобная ситуация имеет место и при использовании температурной реконструкции Moberg et al. [5]. Таким образом, можно сделать заключение, что изменения в глубоком океане начинают проявляться в радиоуглеродных данных уже со второй четверти 19 века.

Рис. 3. Реконструированная скорость генерации изотопа ^{14}C в атмосфере при использовании температурной реконструкции Crowley [6] (А) и Moberg et al. [5] (Б).
1 – $k_1 = 0.1 \text{ K}^{-1}$ и $k_2 = 0$; 2 – $k_1 = k_2 = 0.1 \text{ K}^{-1}$, $t^* = 1825$.

Проведённая работа позволяет сделать следующий вывод. Радиоуглеродные данные описывают не только вариации СА и антропогенной активности в земной атмосфере. По крайней мере, со второй четверти 19 века начинают проявляться изменения в глубоком океане, приводящие к перераспределению углерода между океаном и атмосферой при росте глобальной температуры. Такое раннее начало увеличения скорости перехода выхода CO_2 (≈ 1825 год) из глубокого слоя океана указывает на то, что данный эффект носит, скорее всего, естественный, а не антропогенный характер.

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

Литература

1. Kuleshova A.I. et al. // Geomag. and Aeronomy, 2015, V. 55(8), p.1071
2. Kudryavtsev I.V. et al. // Geomag. and Aeronomy, 2016, V. 56(8), p.998
3. Kuleshova A.I. et al. // Journal of Physics: Conf. Ser., 2018, V.1038 (1), article id. 012005
4. Kuleshova A.I. et al. // Geomag. and Aeronomy, 2018, V. 58(8), p.1097
5. Moberg A. et al. // Nature, 2005, V.433, p.613
6. Crowley T.J. // Science, 2000, V. 289, p. 70
7. Etheridge D.M. et al., 1998. <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.smoothed.yr75>
8. Озурцов М.Г. // Письма в астроном. ж., 2018, Т.44 (4), с.295
9. Reimer P.J. et al. // Radiocarbon, 2009, V.51, p.1111
10. Roth R. and Joos F. // Clim. Past, 2013, V. 9, p.1879