

СОДЕРЖАНИЕ КОСМОГЕННЫХ ИЗОТОПОВ ^{10}Be И ^{14}C В ПРИРОДНЫХ АРХИВАХ, ВАРИАЦИИ КЛИМАТА ЗЕМЛИ И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В СЕРЕДИНЕ ГОЛОЦЕНА

Кудрявцев И.В.¹, Дергачёв В.А.¹, Наговицын Ю.А.²

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

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

THE CONTENTS OF COSMOGENIC ISOTOPES ^{10}Be AND ^{14}C IN NATURAL ARCHIVES, EARTH'S CLIMATE VARIATIONS AND SOLAR ACTIVITY IN THE MIDDLE HOLLOCENE

Kudryavtsev I.V.¹, Dergachev V.A.¹, Nagovitsyn Y.A.²

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

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

The data GISP2 on the content of the cosmogenic isotope ^{10}Be in the ice of Greenland are considered. The reconstruction of the Heliospheric Modulation Potential (HMP) on the time interval (6000–1348) BC is presented. It is shown, that in this time interval there is the decline in the HMP, which is consistent with the decline in global surface temperature after 3000 BC and the decline in the HMP obtained from radiocarbon data. Thus, the decline in global surface temperature of Earth after 3000 BC may be the result of a decrease in solar activity.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-177-180

На рис. 1 приведены данные GISP2 по содержанию космогенного изотопа ^{10}Be во льдах Гренландии [1] на временном интервале, включающем в себя часть последнего Ледникового Периода, переход к Голоцену и большую часть Голоцена. В работе [2] был рассмотрен переход от Ледникового Периода к Голоцену и проанализирован интервал 12000–8000 лет до нашей эры (до н.э.) с целью выяснения связи между вариациями солнечной активности и земного климата.

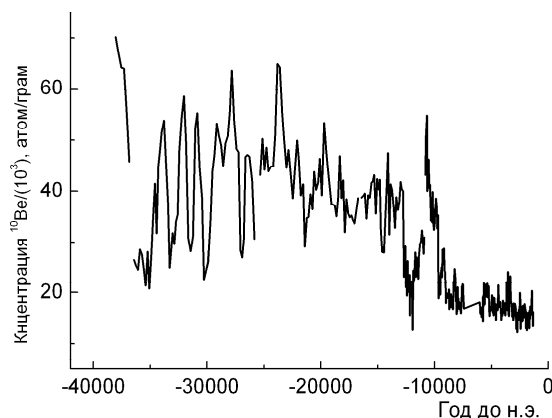


Рис. 1. Содержание изотопа ^{10}Be во льдах Гренландии, GISP2 [1].

В настоящей работе мы рассмотрим Средний Голоцен (рис. 2А), а именно временной интервал с 6000 года до нашей эры (г. до н.э.). Данные GISP2 содержат значение концентрации изотопа ^{10}Be в слоях льда (C , атомов на грамм образца). При этом приведены верхние и нижние границы этих слоёв («Depth top» и «Depth bot», соответственно), а также соответствующим этим границам возраст ($t_{i,\text{top}}$ и $t_{i,\text{bot}}$). На рис. 2В приведена скорость образования этих слоёв (т.е. скорость роста ледника $D_i = (h_{i,\text{bot}} - h_{i,\text{top}}) / (t_{i,\text{bot}} - t_{i,\text{top}})$, где i – номер слоя. Для реконструкции скорости генерации изотопа ^{10}Be в атмосфере Земли под действием космических лучей необходимо перейти от их концентрации C , которая приводится в количестве атомов на грамм вещества (льда) к количеству частиц, осаждающихся на поверхность ледника единичной площади в единицу времени. Так как в данных GISP2 приводятся толщины слоев с их временной привязкой, то количество атомов ^{10}Be , содержащихся в слое i , отнесенное к единице поверхности за временной интервал $(t_{i,\text{bot}} - t_{i,\text{top}})$, будет равно произведению $\rho C_i (h_{i,\text{bot}} - h_{i,\text{top}})$, где ρ – плотность льда. Тогда, плотность потока атомов ^{10}Be , осаждающихся в единицу времени на поверхность ледника будет:

$$P_i = \rho C_i (h_{i,\text{bot}} - h_{i,\text{top}}) / (t_{i,\text{bot}} - t_{i,\text{top}}). \quad (1)$$

Теперь становится возможным рассчитать значение скорости образования генерации изотопа ^{10}Be в земной атмосфере $Q(t)$ в рассматриваемые моменты времени. Для этого, аналогично предыдущим работам различных авторов (например [1, 2, 5]), будем использовать линейную связь

$$Q(t) = k \cdot P(t). \quad (2)$$

Остановимся подробнее на выборе коэффициента пропорциональности k . Значение коэффициента k зависит от места расположения скважины и может зависеть от климатических условий (см., например [5]), и эта зависимость недостаточно изучена. Для образцов, датировка которых захватывает вторую половину 20-го века, значение k может быть найдено из сопоставления расчетных значений ГМП при различных значениях k с определенными при помощи измерений. Так, данные по содержанию изотопа ^{10}Be NGRIP охватывают интервал 1389–1994 гг. н.э., а в работе [6] отмечено, что среднее значение ГМП за период 1950–2000 гг. н.э. составляет ≈ 0.8 ГВ. Это дало возможность произвести оценку коэффициента k . Так согласно работе (Kudryavtsev, 2020), для данных NGRIP $k \approx 0.35$. Для данных GISP2 такой возможности не существует, так как эти данные охватывают временной интервал от 3 тысяч лет до 40 тысяч лет в прошлом. Поэтому однозначного выбора значения k для данных GISP2 не существует.

Реконструкция Гелиосферного модуляционного потенциала (ГМП) проводилась согласно работам [3, 4]. Для этого решалось следующее уравнение:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^2 \int_0^{\infty} Y_i J_i(E, \Phi(t)) (1 - f(E, M(t))) dE, \quad (3)$$

где $Q(t)$ – скорость образования в атмосфере изотопа ^{10}Be ; t – время; f – функция, описывающая противодействие проникновению заряженных частиц в земную атмосферу со стороны магнитного поля Земли (см. например, [3]); M – геомагнитный дипольный момент; Y_i – функции, описывающие генерацию изотопа ^{10}Be под действием протонов ($i = 1$) и α -частиц ($i = 2$) первичных КЛ в атмосфере Земли (Poluianov et al., 2016); J_i – спектр частиц ГКЛ на уровне орбиты Земли; ϕ – ГМП.

Расчеты ГМП на основе уравнения (3) проводились с учетом изменения магнитного поля Земли [6] (рис. 2С) и приведены на рис. 3 для различных значений коэффициента k и $\rho = 1 \text{ г/см}^3$.

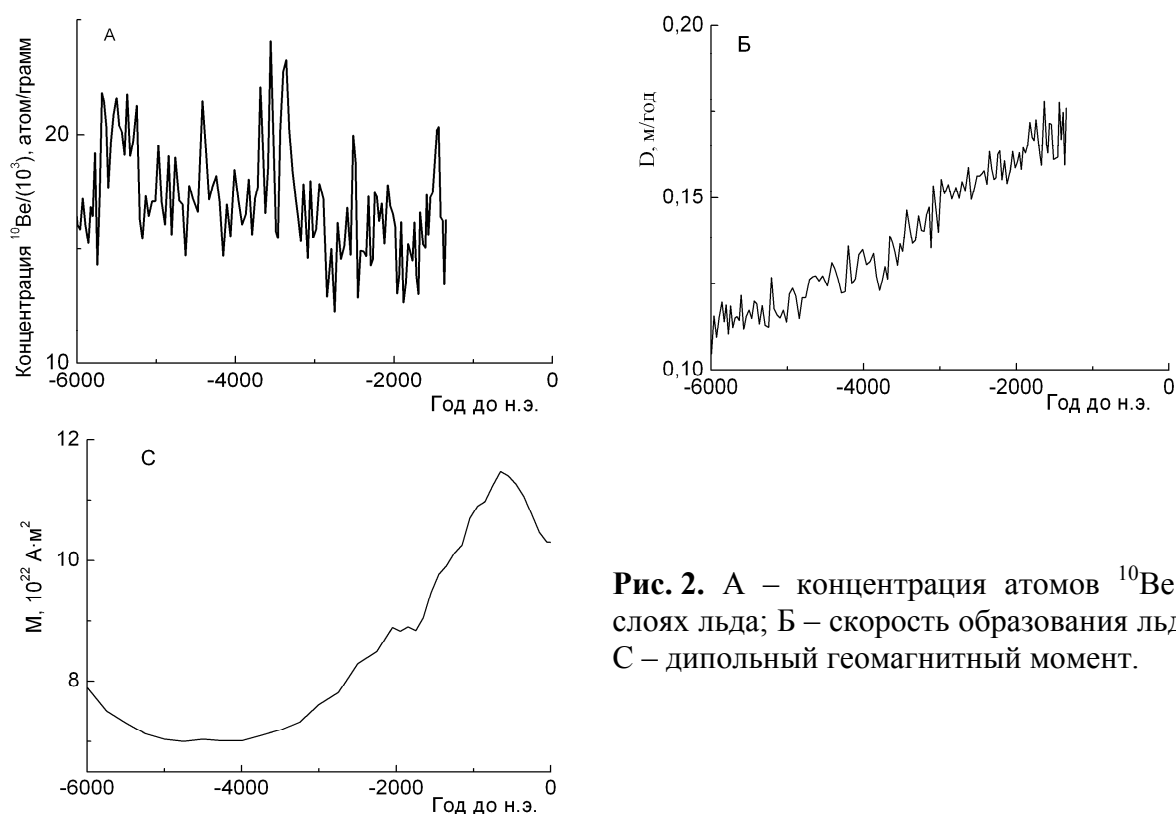


Рис. 2. А – концентрация атомов ^{10}Be в слоях льда; Б – скорость образования льда; С – дипольный геомагнитный момент.

Из рис. 3 следует, что на интервале 6000–1500 лет до н.э. солнечная активность и ГМП уменьшаются и это уменьшение становится сильнее после ~2500 лет до н.э.

На рис. 4А приведено изменение приземной температуры в этот временной интервал согласно работе [7] и можно видеть её уменьшение. В работе [8] были рассмотрены реконструкции ГМП с учетом изменения земного климата на основе радиоуглеродных данных. Одна из таких реконструкций приведена на рис. 4В и на этом рисунке можно видеть резкий спад ГМП после ~3000 г. до н.э.

Таким образом, можно сделать заключение, что спад глобальной температуры после 3000 г. до н.э. может быть связан с понижением СА.

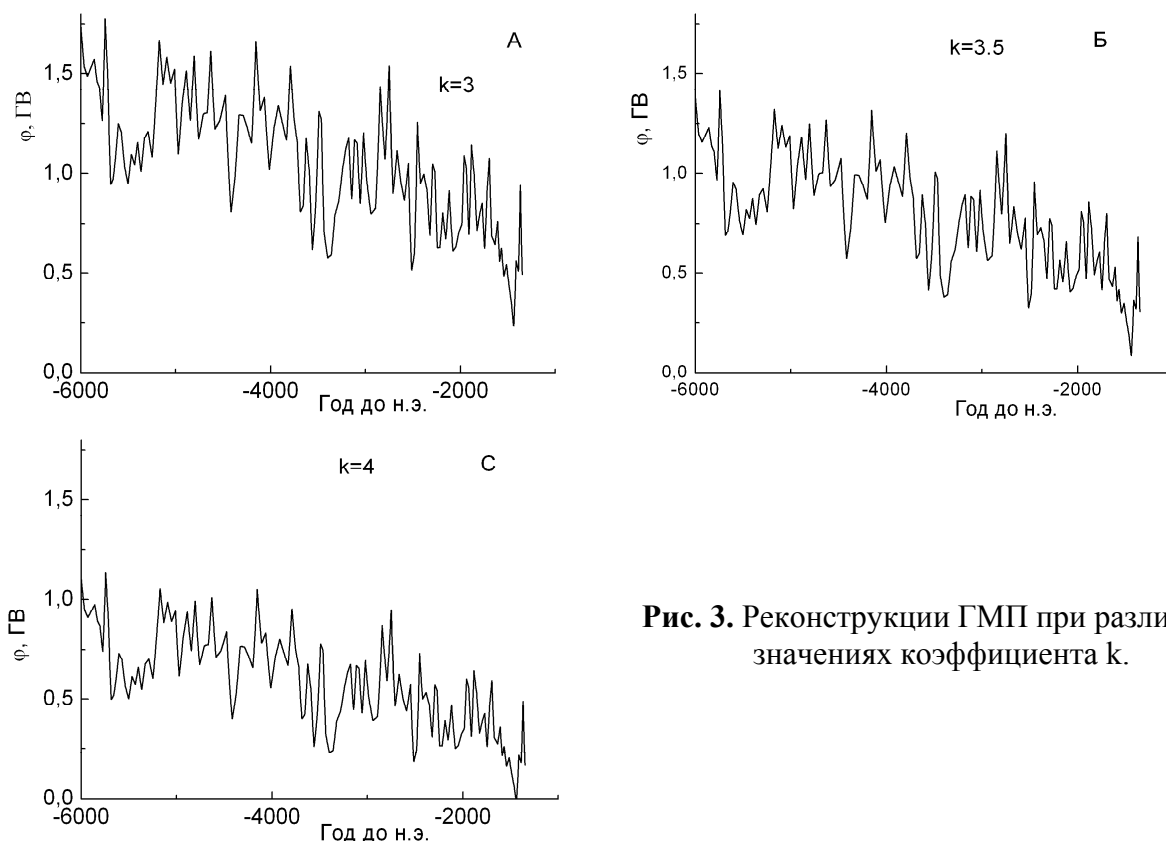


Рис. 3. Реконструкции ГМП при различных значениях коэффициента k .

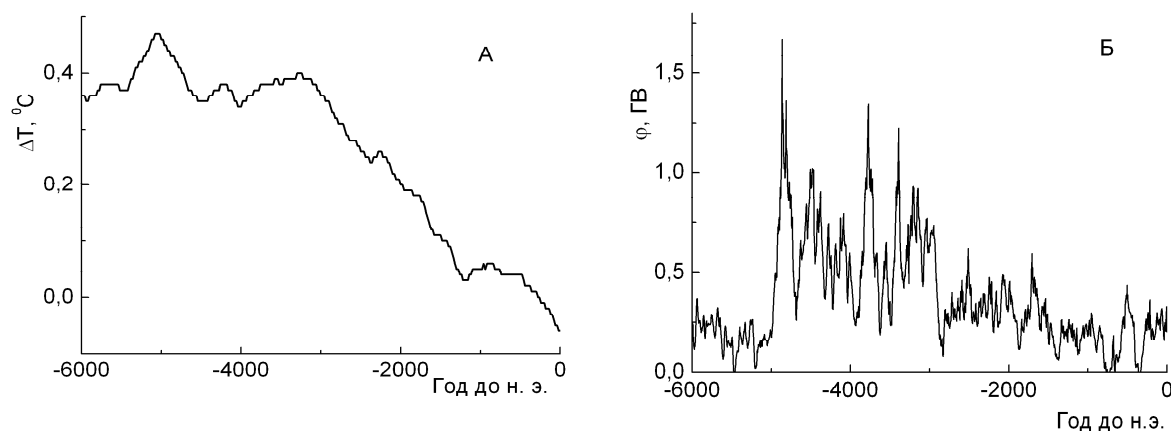


Рис. 4. Изменение глобальной приземной температуры [7]; Б – реконструкция ГМП согласно работе [8].

Литература

1. Finkel R.C. and Nishiizumi K.J. // Geophys. Res., 1997, V. 102, P. 26699
2. Kudryavtsev I.V., Dergachev // Geomag. and Aeronomy, 2021, V61(7). P 1057.
3. Kovaltsov et al. // Earth Planet. Sci. Lett. V. 337- 338. P. 114. 2012.
4. Poluyanov et al. // J. Geophys. Res.: Atmos. V. 121. P. 8125. 2016
5. Ogurtsov M.G. // Astronomy Letters. V.44. P.278. 2018.
6. Muscheler R. et al. // Solar Physics. V. 291. P.3025. 2016.
7. Knudsen M.F. et al. // Earth Planet. Sci. Lett., 2008, V. 272, P. 319
8. Shakun J.D. et al. // Nature, 2012, V. 484, P. 49-55
9. Dergachev V.A. and Kudryavtsev I.V. // Journal of Ph., Conf. Ser., 2021, V.2103,1. 012025