РЕКОНСТРУКЦИИ ГЕЛИОСФЕРНОГО МОДУЛЯЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА И ВАРИАЦИИ КЛИМАТА ЗЕМЛИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 20 ТЫСЯЧ ЛЕТ

Кудрявцев И.В., Дергачёв В.А.

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

RECONSTRUCTIONS OF HELIOSPHERIC MODULATION POTENTIAL AND CLIMATE VARIATIONS OVER THE PAST 20000 YEARS

Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A.

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

We consider reconstructions of the heliospheric modulation potential (HMP) over the past 20 thousand years based on the radiocarbon data, taking into account changes in the Earth's climate. This time interval includes the process of the end of the last ice age and the transition to the Holocene. Variations of the reconstructed values the HMP (i.e., the activity of the Sun) are compared with the global surface temperature. It is shown that high solar activity could lead to the Mayendorf warming and to the recorded temperature maximums around 7000 and 5300 BC. The drop in temperature between 3000-1000 BC and during the Little Ice Age could be the result of low solar activity.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-173-176

Данные по содержанию космогенного изотопа ^{14}C в атмосфере Земли в прошлые столетия и тысячелетия (см., например, [1]) широко используются для изучения изменений солнечной активности (СА) в доинструментальную эпоху. Для этих целей используется и данные по содержанию космогенного изотопа ^{10}Be во льдах полярных зон. Однако эти данные отражают не только скорость генерации этого изотопа под действием Космических Лучей (КЛ), интенсивность которых модулируется солнечной активностью в межпланетном пространстве, но изменение земного климата во времени.

На рисунке 1а представлены вариации глобальной приземной температуры за последние 20 тысяч лет согласно работам [2–4]. Рассматриваемый временной интервал можно разделить на два периода: 1 – от максимума оледенения (~20–22 тысяч лет назад) и до наступления Голоцена (~12 тысяч лет назад) и 2 – Голоцен. Как видно на рисунке 1а, до ~7500 года до нашей эры (г. до н.э.) происходило систематическое увеличение температуры. Во время Голоцена температура не оставалась постоянной. На временном интервале ~ (7500–3000 гг. до н.э.) происходили колебания глобальной приземной температуры, а после имело место систематическое уменьшение температуры (рис. 1а), в том числе, во время хорошо извест-

ного Малого Ледникового Периода (МЛП). Содержание углекислого газа также росло вместе с ростом температуры во время перехода от глобального оледенения к Голоцену. На рисунке 1b показано изменение концентрации CO_2 в земной атмосфере до 1777 г. н.э., согласно работе [5]. Изменения глобальной температуры и содержания CO_2 в атмосфере Земли не могли не сказаться на относительном содержании изотопа ^{14}C в земной атмосфере. Так, в работе [6] отмечен данный эффект для МЛП. В работах [7–9] построена модель радиоуглеродной обменной системы для периода 17000–5000 тысяч лет до н.э. с учетом изменения земного климата и рассчитана скорость генерации изотопа ^{14}C . При этом если до 8000 тысяч лет до н.э. климатические изменения влияли, в основном, на скорость перехода радиоуглерода из океана в атмосферу, то на интервале 8000–5000 лет до н.э. необходимо [8] учитывать и изменение скорости перехода радиоуглерода из атмосферы в биосферу в результате роста растительности. При этом спад содержания CO_2 в атмосфере Земли в интервале 8000–5000 лет до н.э. может быть связан с увеличением скорости перехода из атмосферы в биосферу при увеличении растительности в этот период.

В работе [10] приведена реконструкция Гелиосферного Модуляционного Потенциала (ГМП), который отражает модуляцию ГКЛ и характеризует изменение СА для временного интервала 17000–5000 тысяч лет до н.э. Данная реконструкция проводилась с учетом изменения магнитного поля Земли, согласно работе [11]. Для продления реконструкции ГМП на остальной Голоцен необходимо учесть и изменения климата в Голоцене. К таким изменениям, в первую очередь, следует отнести МЛП и изменения климата, приведшие к превращению Сахары в пустыню. Последнее, очевидно, должно вести к уменьшению растительности и, соответственно, должна уменьшаться скорость перехода углерода (и радиоуглерода) из атмосферы в биосферу. Это, в свою очередь, должно приводить к увеличению содержания CO_2 в атмосфере, что можно видеть на рисунке 1b после ≈ 5000 года до н.э.

Рис. 1. (a) – Изменение глобальной температуры [2–4] и
(b) – Изменение концентрации CO_2 в земной атмосфере [5].

Возникает вопрос: когда скорость перехода из атмосферы в биосферу должна была уменьшиться до современного значения. Здесь мы отметим, что в качестве современных значений скоростей перехода изотопа ^{14}C из одного природного резервуара в другие мы будем принимать значения, полученные в работе [12] и отмеченные в работе [6]. Будем считать, что скорость перехода изотопа ^{14}C из атмосферы в биосферу спадает по линейному закону до современного уровня на временном интервале от 5000 г. до н.э. до момента времени t^* [13]. На рисунке 2 представлены результаты расчетов ГМП на временном интервале 17000 г. до н.э. по 1000 г. н.э., аналогично работе [10], при $t^* = 3000$ г. до н.э. (рис. 2а) и 1000 г. до н.э. (рис. 2б). Как видно из приведенных реконструкций ГМП, активность Солнца могла быть чрезвычайно высокой около 12400, 6700 и 4860 гг. до н.э., эти моменты времени обозначены цифрами 1–3 на рис. 2а. Значения ГМП могло достигать 1 ГВ. Здесь необходимо отметить, что согласно [14], средний ГМП за период 1950–2000 гг. составляет около 0.8 ГВ. Таким образом, в отмеченные периоды СА могла быть на современном уровне. Такая высокая активность Солнца может вызывать потепление на Земле. Известно, что в $\approx (12500\text{--}11850)$ гг. до н.э. на Земле происходило Майендорфское потепление и, следовательно, это потепление могло быть следствием очень высокой активности Солнца около ~ 12400 г. до н.э. Последующий спад и колебания ГМП сопровождаются периодами похолоданий (Древнейший, Древний и Поздний Дриас) и периодами потеплений между ними.

Рис. 2. Реконструированные значения ГМП на основе радиоуглеродных данных.

На временном интервале $\approx (7000\text{--}3000)$ гг. до н.э., согласно [2], глобальная приземная температура держится на максимальных значениях (рис. 1а). На этот временной интервал приходятся периоды экстремально высоких значений ГМП (и СА) (рис. 2а). Резкий спад реконструированных значений ГМП наблюдается после ≈ 3000 г. до н.э. В это же время имело место и уменьшение глобальной температуры (рис. 1а). Около 1200 г. до н.э. наступила некоторая стабилизация глобальной температуры на несколько сотен лет, что соответствует приведенным на рис. 2 реконструк-

циям ГМП. Резкий спад температуры, начавшийся около 800 г. н.э., соответствует началу Малого Ледникового Периода (МЛП).

Реконструкции ГМП на основе радиоуглеродных данных для 2-го тысячелетия нашей эры с учетом вариаций климата была рассмотрена в работах [15, 16] с использованием более подробных данных по вариациям температуры [17, 18] и содержания CO₂ [19] атмосфере Земли. В работе [19] представлена реконструкция ГМП на основе данных NGRIP [21] по содержанию космогенного изотопа ¹⁰Be во льдах Гренландии. Как установлено, в этот период наблюдались такие минимумы СА, как минимумы Вольфа, Шпёрера, Маундера и Дальтона. Таким образом, МЛП мог быть результатом этих минимумов СА. Кроме этого, данные реконструкции показывают, что минимальные значения ГМП во время минимума Шпёрера и Маундера могли быть сравнимыми с минимальным значением ГМП во время минимума Дальтона. Последний из этих минимумов был очень короткий, и после его окончания началось потепление.

Литература

1. Reimer P.J. et al. // Radiocarbon, 2013. V. 55(4). P. 1869.
2. Marcott S.A. et al. // Science. 2013. V. 339. P. 1198.
3. Marcott S.A. and Shakun J.D. // Pages Magazine. 2015. V. 23(1). P. 28.
4. Shakun J.D. et al. // Nature. 2012. V. 484. P. 49.
5. Monnin E. et al. // Earth and Planetary Science Lett. 2004. V. 224. P. 45.
6. Koudriavtsev I.V. et al. // Geochronometria. 2014. V. 41(3). P. 216.
7. Kudryavtsev I.V. et al. // Geomag. and Aeronomy. 2016. V. 56. No. 7. P. 858.
8. Кудрявцев И.В., Дергачев В.А. // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016», ГАО РАН, СПб, 2016, P. 179.
9. Kudryavtsev I.V. et al. // Geomag. and Aeronomy. 2018. V. 58. No. 7. P. 925.
10. Kudryavtsev I.V. and Dergachev V.A. // Geomag. and Aeronomy. 2019. V. 59. P. 1099.
11. Knudsen M.F. et al. // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 272, P. 319.
12. Дорман Л.И // Труды 6 Всесоюзного совещания по проблеме «Астрофизические явления и радиоуглерод». Тбилиси. 1978. С. 49-96.
13. Кудрявцев И.В., Дергачев В.А. // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2020», ГАО РАН, СПб, С. 185.
14. Muscheler R et al. // Solar Physics. 2016. V. 291. P. 3025-3043.
15. Kuleshova A.I. et al. // Geomag. and Aeronomy. 2015. V. 55. P. 1071.
16. Kudryavtsev I.V. et al. // Geomag. and Aeronomy. 2016. V. 56. P. 998.
17. Crowley T.J. and Lowery T.S. // Ambio. 2000. V. 29, P. 51–54.
18. Moberg A. et al. // Nature. 2005. V. 433. P. 613-617.
19. Etheridge D.M. et al. 1998. <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.smoothed.yr75>.
20. Kudryavtsev I.V. / Geomag. and Aeronomy. 2020. V. 60. No. 8. P. 1028.
21. Berggren A.-M. et al. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L11801.