

ВАРИАЦИИ КЛИМАТА ЗЕМЛИ И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В ГОЛОЦЕНЕ

Кудрявцев И.В.^{1,2}, Дергачёв В.А.¹, Наговицын Ю.А.^{2,3}

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

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

³Государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

THE EARTH'S CLIMATE VARIATIONS AND SOLAR ACTIVITY IN THE HOLOCENE

Kudryavtsev I.V.^{1,2}, Dergachev V.A.¹, Nagovitsyn Y.A.^{2,3}

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

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

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

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-195-198>

The question of the causes of climate change on Earth is one of the most pressing in modern science. This is due to the fact that on the Earth's climate, in addition to natural (natural climate change) reasons for such changes, there is currently also an anthropogenic impact. It is well known that solar radiation is the main factor that determines the physical characteristics of the Earth's atmosphere. Therefore, changes in solar activity (SA) cannot but affect variations in the Earth's climate. It is well known that the Little Ice Age on Earth occurred during the deep SA minima of Spörer, Maunder and Dalton. The report analyzes changes in SA and the Earth's climate from the beginning of the end of the last global glaciation (including the Maendorff warming and cold periods called the Dryas) and during the Holocene in order to identify periods of influence of variations in solar activity on changes in the Earth's climate.

На рисунке 1 приведены данные по изменению глобальной приземной температуры согласно работам [1–3], начиная с 20 тыс. лет до нашей эры, включающие в себя период окончания последнего ледникового периода и Голоцена, начинающегося с ≈ 9700 гг. до н.э. Как видно из рисунка 1А, процесс перехода сопровождался продолжительным повышением температуры. При этом около 13000 г. до н.э. начался её ускоренный рост с достижением локального максимума около 11500 г. до н.э. и последующим спадом к ≈ 10700 г. до н.э. Во время данного всплеска температуры на Земле наблюдалось Майендорфское потепление (≈ 12500 – 11850 гг. до н.э.); минимум около 10700 г. до н.э. соответствует периоду похолодания, называемым Поздним Дриасом. В это время глобальная температура не оставалась постоянной. На временном интервале $\approx (8000$ – $3000)$ гг. до н.э. она колебалась около максимального значения, а с ≈ 3000 гг. до н.э. происходит её продолжительный спад до окончания Малого Ледникового Периода (МЛП).

Рассмотрим изменение Гелиосферного Модуляционного Потенциала (ГМП) $\phi(t)$, полученного в работах [4–9] на основе радиоуглеродных данных с учетом климатических изменений, и который характеризует вариации солнечной активности (СА). На рисунке 1А приведена глобальная температура [2] в течение нашей эры. Резкое уменьшение температуры во втором тысячелетии нашей эры соответствуют серии минимумов СА: Оорта (~1050 гг. н.э.), Вольфа (~1300 гг. н.э.), Шперера (~1400–1500 гг. н.э.) и Маундера (~1645–1700 гг. н.э.). Расчеты ГМП на основе космогенных изотопов показывают минимумы $\phi(t)$ в эти периоды. На рисунке 2Б приведены расчеты $\phi(t)$ [9] на основе данных NGRIP по содержанию космогенного изотопа ^{10}Be в Гренландии [10], усредненные по 11 годам. Расчеты ГМП на основе радиоуглеродных данных с учетом вариаций земного климата приведены, например, в работе [11]. Сказанное выше указывает на то, что похолодание на Земле во втором тысячелетии нашей эры (МЛП) может быть результатом понижений СА.

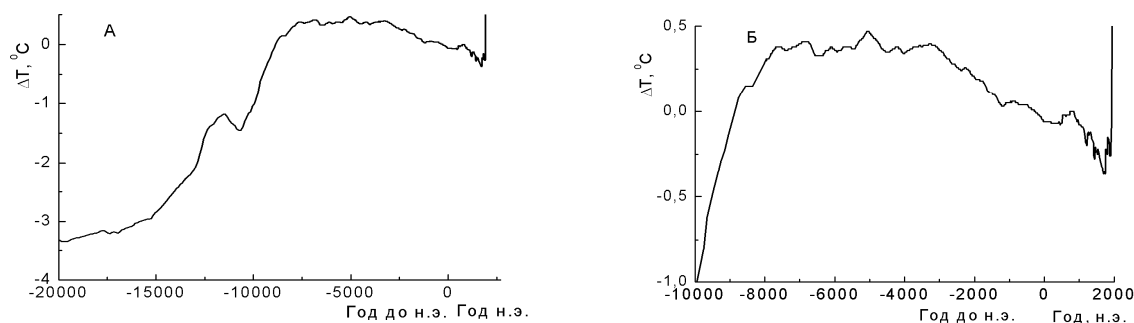


Рис. 1. Вариации глобальной температуры согласно [1–3].

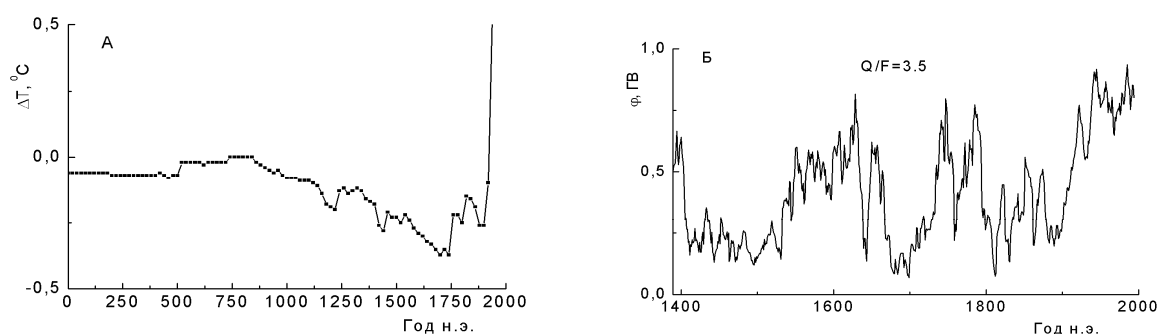


Рис 2. А – Вариации глобальной температуры во втором тысячелетии нашей эры согласно [3]; В – реконструкция ГМП [9].

В работах [4–8, 12] приведены реконструкции ГМП с 17000 г. до н.э. на основе радиоуглеродных данных с учетом вариаций земного климата. Одна из таких реконструкций приведена на рисунке 3. На этой реконструкции можно выделить ряд временных интервалов с пониженной СА. В первую очередь необходимо отметить временные интервалы около 300 и 700 гг. до н.э. (выделены цифрами 1 и 2 на рисунке 3) (см также [13]), ко-

торые соответствовали хорошо известному похолоданию Железного Века в 900–300 годах до нашей эры перед наступлением субантлантического периода [14]. Одним из самых известных периодов похолодания является Поздний Дриас (около 10700 гг. до н.э.), который, как оказывается, соответствует периоду низких значений ГМП (выделено цифрой 5 на рисунке 3), т.е. низкой СА. Как было отмечено выше, в ≈ 12500 –11850 гг. до н.э. на Земле происходило Майендорфское потепление. Реконструкция ГМП [4] на основе радиоуглеродных данных показывает высокие значения ГМП в этот период, что указывает на то, что Майендорфское потепление могло быть результатом повышенной СА. Между этим потеплением и Поздним Дриасом происходили периоды похолоданий (Древнейший и Древний Дриасы) и потеплений. На рисунке 3 можно видеть соответствующие вариации ГМП. Таким образом, не только Поздний Дриас, но и Древний и Древнейший Дриасы могут быть результатами уменьшения СА.

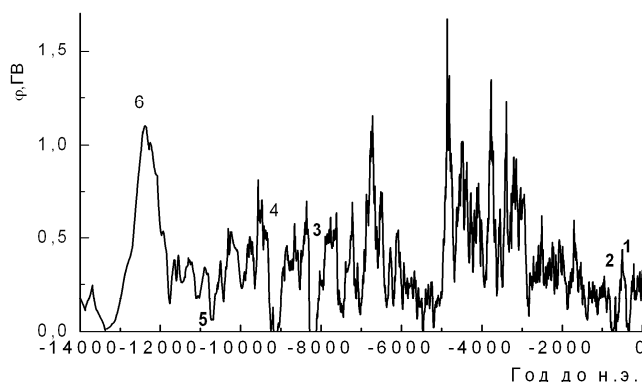


Рис. 3. Одна из реконструкций изменения ГМП во времени.

Как было отмечено выше, приведенная на рисунке 3 реконструкция ГМП была получена с учетом изменения земного климата. Эта реконструкция показывает, что спад глобальной температуры, начиная с 3000 г. до н.э., также может быть результатом спада СА (см. спад ГМП на рис. 3).

В работе [15] представлены расчеты ГМП на основе данных GISP2 по содержанию космогенного изотопа ^{10}Be во льдах Гренландии [16] на временном интервале, включающем в себя часть последнего Ледникового Периода, переход к Голоцену и большую часть Голоцена. Одной из основных сложностей использования данных по содержанию изотопа ^{10}Be в ледниках является задание зависимости скорости осаднения этого изотопа на поверхность ледника F со скоростью образования этого изотопа в земной атмосфере Q . Эта связь может зависеть от места расположения ледника и может меняться во времени, например, при смене климатических условий, которые влияют на процессы переноса в земной атмосфере. В работе [15] произведены расчеты для различных значений отношения $k = Q/F$, пример приведен на рисунке 4 для $k = 3$. Как видно из рисунка 4, солнечная активность на интервале 6000–1000 гг. до н.э. уменьшается, а после 3000 г. до н.э. спад СА становится более сильным. Это также свидетельствует в поль-

зу того, что спад глобальной температуры после 3000 г. до н.э. может быть результатом уменьшения СА.

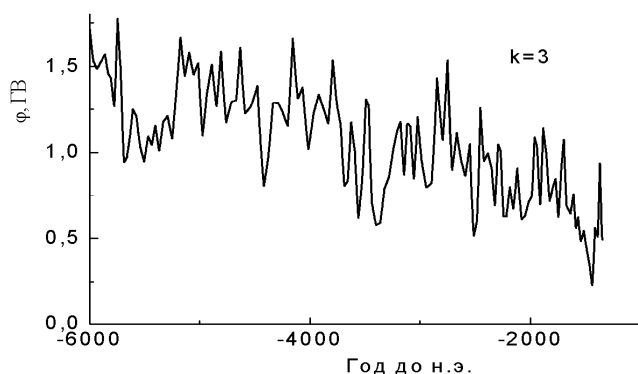


Рис. 4. Реконструкция ГМП на основе данных GISP2.

Сформулируем выводы данной работы.

1) При анализе временного хода глобальной приземной температуры можно выделить интервалы длительностью в сотни лет, в течение которых уменьшение температуры может быть результатом уменьшения СА. К таким периодам, кроме МЛП, можно отнести уменьшение температуры в первом тысячелетии до н.э., во время Позднего Дриаса, а также, возможно, во время Древнего и Древнейшего Дриаса. Кроме этого, имеются указания, что на Земле наблюдалось похолодание около 9100 гг. до н.э. [17], и оно может также быть связано с понижением СА [18].

2) Майендорфское потепление может быть вызвано ростом СА.

3) Длительный спад температуры после 3000 г. до н.э. мог быть вызван уменьшением СА.

Литература

1. Shakun J.D. et al. // Nature, 2012, V. 484, P. 49-55
2. Marcott S.A. et al. // Science, 2013, V. 339, p. 1198
3. Marcott S.A., Shakun J.D. // Pages Magazine, 2015, V. 23(1), p. 28
4. Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A. // Geomagnetism and Aeronomy, 2019, V. 59, p. 1099
5. Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A. // Geomagnetism and Aeronomy, 2021, V. 61, p. 1057
6. Dergachev V.A. et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2020, V. 60, No. 7, p. 835
7. Dergachev V.A. et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2019, V. 59, No. 7, p. 846
8. Dergachev V.A. et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2020, V. 60, No. 8, p. 1028
9. Kudryavtsev I.V. // Geomagnetism and Aeronomy, 2020, V. 60, No. 8, p. 1028
10. Berggren A.M. et al. // Geophys. Res. Lett., 2009, vol. 36, L11801
11. Kudryavtsev I.V. et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2016, V. 56, No. 8, pp. 998
12. Kudryavtsev I.V. et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2022, V.62, No. 7, p. 851
13. Usoskin I.G. et al. // Astronomy and Astrophysics, V.471. P.301. 2007
14. Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. Тысячелетняя летопись необычных явлений природы. — М.: Мысль, 1988
15. Кудрявцев и др. / Труды конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2022», Санкт-Петербург, Пулковское, 3 – 7 октября 2022, С. 177
16. Finkel R.C. and Nishiizumi K.J. // Geophys. Res., 1997, V. 102, P. 26699
17. Larsen N.K. et al. // Nat. Commun., 2018, Vol. 9, id 1872
18. Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A. // Geomagnetism and Aeronomy, 2021, V. 61, p. 1057