ГЛОБАЛЬНАЯ КАРТИНА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В ОБОИХ ПОЛУШАРИЯХ В ТЕЧЕНИЕ ПОСЛЕДНИХ 20 ТЫС. ЛЕТ И ТЕНДЕНЦИЯ ПОХОЛОДАНИЯ В ПОСЛЕДНИЕ ~ 2000 ЛЕТ

Дергачев В.А.

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

e-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru

GLOBAL PICTURE OF TEMPERATURE VARIABILITY IN THE BOTH HEMISPHERES DURING THE LAST 20 THOUSAND YEARS AND A COOLING TENDENCY IN THE LAST ~ 2000 YEARS

Dergachev V.A.

Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia

e-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru

In work it is spent comparison and the analysis of the anomalies of temperatures of Greenland and Antarctica, covering last two interglacial intervals. As a whole, reconstructed temperatures show smaller changes for the modern interglacial interval (the Holocene), than for the previous Eemian interglacial interval. The basic attention is given to the picture of temperature variability during the period from last glacial maximum till now, covering the last approximately 20 thousand years and last 2000 years (reconstructions of temperature evolution are made). It is essential to notice that Greenland and Antarctica temperatures on time interval from 0 till 1900 show the total tendency of cooling. Thus, warming of continental scale across Antarctica within last century is not traced. The received results are important for understanding of last and future climate variability.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-139-144

Введение

Похолодания и потеплениями на всей поверхности Земли в зависимости от возмущения орбитальных элементов Земли проходили на протяжении всей её истории. Сейчас человечество живёт в ледниково-межледниковом периоде, который развивался после отступления последнего ледникового периода, начавшегося 19–17 тыс. лет назад. Исследование предыдущего (Эемское, 129–128 – 117–116 тыс. лет назад) и современного (Голоцен), которое продолжается уже более 10 тыс. лет, межледниковых периодов критически важно для понимания дальнейшей эволюции климата и оценки времени окончания современного межледниковья и начала наступления очередного ледникового периода. Получение детальной информации о закономерностях изменения климата может быть связано с изучением ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды, океанических отложений и непрерывных земных прокси данных.

В работе рассматриваются основные доступные прокси данные индикаторов климата двух полярных ледниковых щитов для двух последних

межледниковых периодов. Если непрерывные записи изменений климата в Эемское межледниковье для Антарктиды были получены в ряде исследований, то попытки получить полную запись для Гренландии оставались проблематичными. И только к 2013 году, благодаря исследованиям большой группы учёных [1] удалось решить эту проблему. В 2008–2012 гг. в Гренландии (проект NEEM) на высоте 2450 м (77.45°N, 51.06°W) был пробурен ледяной керн длиной 2540 м. Этот новый керн льда (керн NEEM) уходит в прошлое к последнему Эемскому межледниковому периоду 130–115 тыс. лет назад от 1950 года, период, более тёплый, чем наше текущее межледниковье (Голоцен).

Основное внимание уделено изучению изменений климата по данным Гренландского и Антарктического щитов во временные интервалы, охватывающие 1) межледниковья (Эемское и Голоцен), последние ~ 20 тыс. лет и 3) с начала нашей эры.

Сравнение двух последних межледниковых периодов по климатическим данным Гренландии и Антарктиды

Изменение температуры Гренландии в течение последних 250 тыс. лет основано на реконструкциях: I – для временного интервала с 11.7 тыс. лет назад до настоящего времени [2], II – NGRIP реконструкция для интервала 115–11.7 тыс. лет назад [3], III – реконструкция для интервала 135–115 тыс. лет назад [1] и IV – реконструкция (синтетический ряд) для интервала 250–135 тыс. лет назад [4]. Объединённые в работе [5] данные за 150 тыс. лет (рис. 1а), показывают аномалии температуры Гренландии в Эемское и современное межледниковья, а также воздействие изменений палеоокеанической температуры (ΔT) на эволюцию Гренландского ледяного щита на

Рис. 1. а) Аномалии поверхностной температуры Гренландского ледяного щита (сплошная кривая) и океанической температуры Гренландии (точечная кривая) за последние 150 тыс. лет [5]. Указан климатический индекс α , чтобы корректировать климатологические поля в настоящее время к изучаемому интервалу, т.е. индекс может быть интерпретирован как аномалия палеоокеанической температуры T . **б)** Изменение температуры в Антарктиде (купол Dome C) для последних 140 тыс. лет [6].

ледниково-межледниковой временной шкале. Хотя эволюция Гренландского ледового щита является результатом атмосферного и океанского воздействий, работающих вместе, авторы [5] показали, что океан является основным стимулятором роста ледникового щита (наступления).

В каждом межледниковом цикле можно выделить (рис. 1) период потепления (1), плато (2), и период похолодания (3). Ледниковые и межледниковые периоды являются очень различающимися климатическими циклами. Из рис. 1 следует, что в Эемское межледниковье, как в Гренландии, так и в Антарктиде, было существенно теплее, чем в современное межледниковье. Так, температуры поверхности Гренландии, найденные в NEEM керне [1], оказались на $8\pm 4^{\circ}\text{C}$ более теплые, чем средние для прошлого тысячелетия. Как известно, сторонники антропогенного вмешательства в природу считают, что современный тёплый период может продлиться ещё несколько тысяч лет. Имеем ли мы такой запас? Следует отметить, что на протяжении последнего миллиона лет идёт постепенное снижение в температуры.

Температурные вариации с момента окончания последнего оледенения по данным кернов льда Гренландии и Антарктиды

Максимум последнего ледникового периода приходится примерно на 20 тыс. лет назад. С момента начала его завершения отмечаются одновременные повышение температуры и содержание CO_2 в земной атмосфере. Изучению изменений климата по данным природных архивов с момента окончания последнего оледенения, включая Голоцен (последние ~ 11.5 тыс. лет), уделяется большое внимание исследователей (напр., [7]) и в ряде международных совместных проектов, напр., [8]. Изучение восстановленной из природных архивов изменений температуры на этом временном интервале позволило выделить ряд осцилляций (повышения и понижения) температуры (рис. 2).

Сравнение рис. 2а и 2б показывает, что изменения температуры в Гренландии и Антарктиде имеют подобные тенденции практически на всём временном интервале. По крайней мере, долговременный тренд указывает на слабое понижение температуры после максимума Голоцена.

Остановимся на данных, представленных на рис. 2в, где сравниваются изменения глобальной поверхностной температуры Земли и глобальной температуры в океане. На рис. 2в1 показаны особенности изменений глобальной температуры в северном и южном полушариях и показана тенденция изменения глобальной поверхностной температуры. Штриховые линии указывают на неопределенность данных. Особый интерес представляют данные по глобальной температуре океана (рис. 2в2). Следует отметить, что сведения об отклике океана на возмущения климата крайне малы вследствие ограниченных наблюдений и нехватки надежных реконструкций. В недавно опубликованной статье авторы [12], используя отношения

благородных газов (Kr/N_2 , Xe/N_2 , Xe/Kr), захваченных в ледяных кернах, провели реконструкцию глобальной температуры океана и показали, что средняя глобальная океанская температура в течение последнего ледникового перехода (от 20000 до 10000 лет назад), увеличилась на $2.57 \pm 0.24^\circ\text{C}$ (рис. 2в). Авторы показали, что представленная реконструкция океанической температуры обеспечивает беспрецедентную точность и временное разрешение для интегрированного глобального океана, не обеспечиваемые другими методами реконструкции.

Рис. 2. Изменение климатических характеристик в Гренландии после окончания последнего оледенения:

а) Реконструкции температуры, основанные на измерении различных изотопов в керне льда NGRIP. Кривая 1 – температуры NGRIP, рассчитанные [9]. Кривая 2 – оценки температуры [10]. Отмечены интервалы климатических событий: LGM – максимум последнего оледенения, B-A – Бёллинг-Алерёд потепление, YD – Younger Dryas, EH – ранний Голоцен, MH – средний Голоцен и LH – поздний Голоцен. Стрелками отмечены также небольшие похолодания в Голоцене: *а*, *б*, *в*.

б) Осцилляции температуры ΔT в Антарктиде (относительно 1960–1990 гг.) по данным керна льда (стабильные изотопы кислорода и водорода со станции Восток) [11].

в) Сравнение изменений поверхностной температуры Земли (1) с изменением глобальной температуры в океане (2) для последнего ледникового перехода [12]. Отмечен HS1 – период потепления 17690–14580 лет назад и другие климатические события.

Арктическая и Антарктическая изменчивость климата (температуры) в течение прошлых 2 тысячелетий

Как было показано выше, главная климатическая тенденция характеризуется долгосрочным похолоданием. Попытаемся проследить тенденции

изменения температуры в течение последних 2000 лет в данных по Арктической и Антарктической изменчивости климата.

Рассмотрим естественную изменчивость температуры в Гренландии и Антарктиде и тенденции её на протяжении прошлых 2000 лет, используя основные доступные прокси данные для реконструкций температуры. Арктическая и Антарктическая изменчивость климата в течение прошлых 2 тысячелетий широко исследуется в последние десятилетия (рис. 3).

Рис. 3. Арктическая и Антарктическая изменчивость климата в течение прошлых двух тысячелетий:

а) Сравнение реконструкций температуры Арктики для последних 2000 лет: 1 – [13], используя прокси данные и 2 – [14]. Можно видеть различие в температурах на фактор 2.

б) Изменение летней арктической температуры воздуха по данным из озёрных отложений, кернов льда и колец деревьев относительно 1961–1990 гг. [15].

1 – Изменчивость в исследуемых данных, 2 – летние температуры, 3 – долговременный тренд, 4 (серая линия) – летние температуры по данным погодных станций Арктики.

в) Температурные реконструкции для семи различных регионов Антарктиды (данные изотопов воды в кернах льда) [16]. Выделены достоверные тенденции похолодания, рассчитанные для периода 0 -1900 гг. по моделям: 1 – [17] и 2 – [18].

г) Изменение летней температуры в Северной Европе по данным изменения ширины годовых колец деревьев [19]. Указаны годовые изменения летней температуры (вертикальные чёрные линии), температуры после сглаживания 100-летним фильтром (кривая) и тренд похолодания (черная линия). Долгосрочная тенденция похолодания составляет $-0.31 \pm 0.03^{\circ}\text{C}$ за тысячу лет.

Наблюдения указывают на региональные тенденции похолодания (рис. 3в) по континенту, что предполагает отсутствие потепления в Антарктиде континентального масштаба в течение прошлого столетия и явля-

ется надёжным результатом. Небольшое потепление, видимое на рисунке в течение последних 100 лет, не превышает естественных изменений температуры на всём исследованном интервале времени.

Выводы

Главная климатическая тенденция характеризуется долгосрочным похолоданием. Небольшое потепление в Антарктиде в течение последних 100 лет не превышает естественных осцилляций температуры на всём исследованном интервале времени. Современное потепление, прослеживаемое в реконструкциях на других континентах, пока ещё не превышает естественных изменений температуры в прошлом. Предыдущий межледниковый период был более теплым, чем средневековое потепление. Теплые температуры поверхности Гренландии во время межледникового периода приблизительно 130 000 лет назад были на $8\pm 4^{\circ}\text{C}$, более теплые, чем среднее за прошлые 1000 лет.

Литература

1. *NEEM*: // Nature, 2013, V. 493, P. 489–494, <https://doi.org/10.1038/nature11789>
2. *Vinther B.M. et al.* // Nature, 2009. V. 461, P. 385–388, <https://doi.org/10.1038/nature08355>
3. *Kindler P. et al.* // Clim. Past, 2014, V. 10, P. 887–902, <https://doi.org/10.5194/cp-10-887-2014>
4. *Barker S. et al.* // Science, 2011, V. 334, P. 347–351, <https://doi.org/10.1126/science.1203580>
5. *Tabone I. et al.* // Clim. Past, 2018, V. 14, P. 455–472, <https://doi.org/10.5194/cp-14-455-2018>.
6. *Jouzel J. et al.* // Science, 2007, V. 317 (5839), P. 793–796. doi: 10.1126/science.1141038 2007.
7. *Heinemann M. et al.* // Climate of the Past, 2014, V. 10. P. 1567–1579. www.clim-past.net/10/1567/2014/doi:10.5194/cp-10-1567-2014.
8. *Alder J.R. and Hostetler S.W.* // Climate of the Past. 2015, V. 11(3). P. 449–471. www.researchgate.net/publication/273764639.
9. *Shakun J.D. et al.* // Nature, 2012, V. 484, P. 49–55.
10. *Buizert C. et al.* // Science, 2014, V. 345, pp. 1177–1180.
11. *Davis W.J. et al.* // Climate, 2018, V. 6, Iss 1, p 3.
12. *Bereiter B. et al.* // Nature, 2018, V. 553. P 39–44.
13. *Kaufman D.S. et al.* // Science, 2009, V. 325(5945), P. 1236–1239.
14. *PAGES 2k Consortium.* // Nature Geoscience. V. 6, P 339–346 DOI: 10.1038/NGEO1797.
15. *AMAP, 2012.* Arctic Climate Issues 2011: Changes in Arctic Snow, Water, Ice and Permafrost. SWIPA 2011 Overview Report.
16. *Stenni B. et al.* // Clim. Past, 2017, V. 13, P. 1609–1634. <https://doi.org/10.5194/cp-13-1609-2017>,
17. *Werner M. et al.* // J. Geophys. Res. - Atmos., 2011, V. 116, D15109, <https://doi.org/10.1029/2011JD015681>, 2011. <https://doi.org/10.1029/2011JD015681>
18. *Nicolas J.P. and Bromwich D.H.* // Climate, 2014, V. 27, P. 8070–8093. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00733.1>
19. *Esper J. et al.* // J. Quatern. Sci, 2014, V. 29(5). P. 487–494.