

КОЛЕБАНИЯ КЛИМАТА В АНТАРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ВРЕМЕННОЙ ШКАЛЕ И ТЕКУЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Дергачев В.А.

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

CLIMATE FLUCTUATIONS IN THE ANTARCTIC REGION ON A LONG TIME SCALE AND CURRENT CLIMATE CHANGES

Dergachev V.A.

Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

The Antarctic is a highly connected system with non-linear interactions between the atmosphere, ocean, ice and biota, as well as complex connections to the rest of the Earth system. Antarctica and the Southern Ocean make up the most important part of the Earth system. Antarctica is the coldest, driest, and most remote continent that is undergoing a variety of environmental changes in response to climate change, in particular modern warming, around which there is heated scientific debate. The question remains as to whether the recent and accelerating warming trend is part of natural climate variability or the result of anthropogenic activities. You may not get an unambiguous answer if you do not decipher how climate processes changed in the distant past. About 60–50 million years ago, there is a long-term trend towards a decrease in carbon dioxide concentration, average temperature and a decrease in ocean level, and in the interval of the last millions and hundreds of thousands of years, the history of the Earth was characterized by alternating cycles of cold (glacial) and warm (interglacial) climatic fluctuations, which led to a number of large-scale environmental and atmospheric changes, in particular, the formation and melting of huge ice sheets, dramatic changes in global sea levels, etc.

The article examines past trends in climate change in various regions of Antarctica, climate change since the end of the last ice age and current climate changes and the relationship of these changes to the causes that give rise to them.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-85-90

Введение (Антарктика. Сведения о регионе)

Полярные регионы нашей планеты играют важную роль в процессах, воздействующих на окружающую среду в глобальном масштабе, и являются индикаторами глобальных климатических изменений. Антарктика – южная полярная область Земли, включающая в себя замерзший континент Антарктиду и прилегающие к ней южные акватории Тихого, Атлантического и Индийского океанов с островами. Значительная часть материка Антарктиды находится ниже уровня моря и представляет собой шельф. Почти на всей поверхности Антарктиды (96%) лежит снежно-ледовый покров, характеризующийся высоким альбедо. Антарктида покрыта огромным ледяным панцирем, толщина которого доходит до нескольких километров. Ледники Антарктиды накапливались в ходе ледниковых периодов

последних миллионов лет. Антарктида – наиболее холодный регион на Земле и место, где формируется погода (циклоны и антициклоны) на нашей планете. Без знания того, как ледяной щит Антарктиды в геологическом прошлом реагировал на изменение климата (в частности, на потепление), трудно определить его роль в будущем глобальном изменении климата и изменении уровня океана. Антарктические ледяные щиты включают в себя механизмы, которые до сих пор изучены недостаточно. В результате глобального потепления и таяния ледников в настоящее время происходит повышение уровня Мирового океана и усиление экстремальных климатических явлений. Имеет место и заметная тенденция к потеплению в Антарктиде.

Прогноз климата ближайшего будущего не может быть основан только на имеющихся коротких рядах инструментальных наблюдений, длина которых для Арктики и Антарктики достигает лишь 60–70 лет, тогда как естественные циклические изменения климата имеют периоды в десятки, сотни, тысячи лет и более длительные. Совершенно очевидно, что колебания климата, амплитуды которых значительно отличались от современных значений, существовали всегда и в пределах различных интервалов времени.

Ниже кратко рассматриваются тенденции изменения климата в Антарктическом регионе и возможная роль солнечной активности в изменениях климата Антарктиды.

Изменения климата Антарктиды во времени

Чтобы понять текущее и будущее изменение климата, необходимо рассматривать промежутки времени в прошлом, когда климат был подобен сегодняшнему или теплее. Геологические данные предоставляют как качественные, так и количественные доказательства изменения климата в прошлом. На протяжении большей части своей истории Земля находилась в парниковом состоянии, значительно теплее, чем сейчас, без полярных ледяных шапок и высокого уровня моря. Концентрации «парникового» CO_2 в земной атмосфере сильно менялись в течение геологического прошлого из-за естественных процессов и часто были выше, чем сегодня. Климат Земли на больших временных масштабах зависит от множества факторов, связанных как с внешними причинами, так и внутренними процессами, происходящими в недрах нашей планеты и на её поверхности. С момента установления существования покровных оледенений Земли в геологическом прошлом, для объяснения ледниковых эпох были предложены десятки гипотез и теорий. Изменения климата Антарктики в прошлом удаётся реконструировать по данным измерений климатических характеристик, зафиксированных в кернах льда, озерных и морских отложениях и с помощью численных моделей.

В работе [Lear et al., 2021] отражены тенденции изменения углекислого газа, протяжённости отложений континентального льда, температуры

придонной воды и объема льда на интервале последних примерно 500 млн. лет. Отметим, что примерно с 60 млн. лет назад имеет место заметное снижение концентрации углекислого газа (рис. 1). Похолодание и снижение содержания CO_2 в атмосфере привело к оледенению Антарктиды около 34 млн. лет назад (переход от эоцена к олигоцену). На скорость поступления CO_2 в атмосферу на длительных временных масштабах влияют плитотектонические процессы, которые контролируют скорость вулканизма и другие процессы.

Рис. 1 демонстрирует тенденции изменения климатических характеристик за последние миллионы и сотни тысяч лет. На рис. 1а концентрация $\delta^{18}\text{O}$ в бентосных фораминиферах отражает комбинацию температуры придонной воды и объема льда [Zachos et al., 2008]. Относительно быстрое чередование ледников с низким содержанием CO_2 и межледниковьями с высоким содержанием CO_2 в последние примерно 50 млн. лет, по-видимому, обусловлено орбитальным воздействием.

McKay et al. (2016) проследили тенденцию похолодания Антарктики после последнего мощного среднеэоценового климатического оптимума около 50 млн. лет назад (рис. 1а), когда данные морских отложений Антарктиды и Южного океана зафиксировали отсутствие льда в субтропической Антарктиде между ~52 и 40 млн. лет назад. В общем, самый теплый глобальный климат за последние 65 млн. лет пришелся на эпоху раннего эоцена (около 56–4 млн. лет назад), а уровни углекислого газа в атмосфере превышали одну тысячу частей на миллион по объему, что близко к рассчитываемым прогнозам для атмосферы Земли.

Сравнение долговременных изменений: уровня моря [Kominz et al., 2008], уровня углекислого газа в атмосфере [Pagani et al., 2005] и глобальной температуры атмосферы [Crowley and Kim, 1995] в течение 60 млн. лет представлено на рис. 1б. Следует отметить общие закономерности тенденций изменения рассматриваемых характеристик на большей части интервала.

Изменение усреднённых данных климатических параметров на интервале последнего 0.8 миллиона лет (800 тыс. лет назад) показано на рис. 1с [Bereiter et al. 2015]; [Lisiecki and Raymo, 2005] и рис. 1д [Parrenin et al., 2013]; [Friedrich et al., 2016].

При объяснении цикличности повторения ледниковых эпох в прошлом естественным представляется связать их с изменением солнечной инсоляции на соответствующей временной шкале, когда более высоким значениям инсоляции должен соответствовать более теплый климат, а холодный климат должен соответствовать более низким значениям инсоляции.

Проанализируем характер изменения климатических характеристик в Антарктиде после максимума последнего оледенения, в голоцене и в последние десятилетия.

Рис. 2а представляет изменение температуры, углекислого газа и метана в Антарктических ледяных кернах на интервале окончания последнего оледенения (последняя дегляциация имела место от 18 000 до 11 000 лет

назад) [Chowdhry Beeman et al., 2019]. Отметим синхронность изменения CO_2 и температуры.

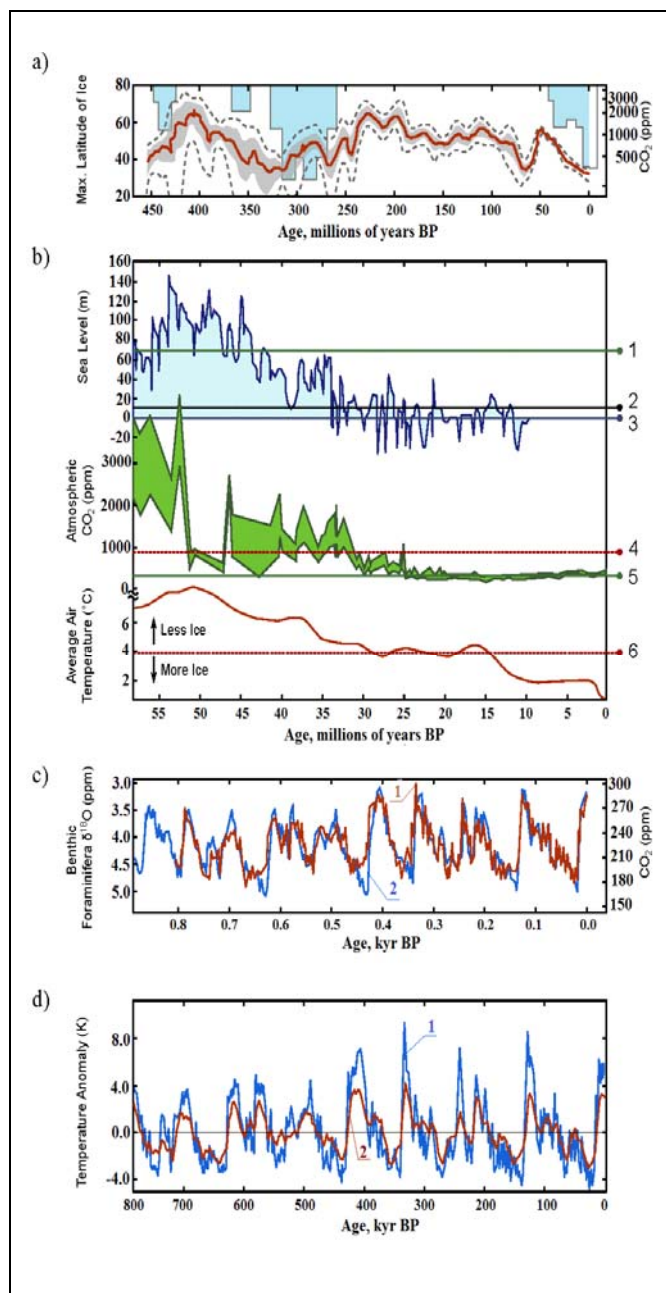


Рис. 1. Тенденции изменения климатических характеристик на интервалах в миллионы и сотни тысяч лет:

а) широтная протяжённость отложений континентального льда [Crowley and Burke, 1998] (выделенные области) и концентрация углекислого газа в атмосфере [Foster et al., 2017]. Заштрихованная полоса – 68% доверительный интервал;

б) сравнение долговременных изменений: *верхние кривые* – колебания уровня моря [Kominz et al., 2008] в ответ на предполагаемые изменения объема льда во времени; *средние кривые* – уровни углекислого газа в атмосфере [Pagani et al., 2005]; *нижняя кривая* – изменение глобальной температуры атмосферы [Crowley and Kim, 1995].

с) изменения концентрации CO_2 в ледяных ядрах Антарктиды (1) [Bereiter et al., 2015] (1) и соотношение изотопов кислорода в фораминиферах ($\delta^{18}\text{O}$) [Lisiecki and Raymo, 2005] (2) на интервале последних 0.8 млн. лет;

д) сводные данные о температуре Антарктиды (1) [Pargen et al., 2013] и смоделированная глобально усредненная приземная температура воздуха в Антарктиде на интервале последних 800 тыс. лет (2) [Friedrich et al., 2016].

Горизонтальными линиями на рис. б) указаны: 1 – величина глобального повышения уровня моря, если и Гренландский ледяной щит, и Западно-Антарктический ледяной щит растают; 2 – величина глобального повышения уровня моря, если растаял весь нынешний лед на Земле; 3 – современный уровень моря; 4 – проектируемый уровень атмосферного CO_2 к 2100 году, 5 – доиндустриальный уровень атмосферного CO_2 , 6 – проектируемый уровень изменения средней температуры воздуха к 2100 году.

Для выяснения причин изменения температуры в Антарктиде авторы [Jones et al., 2021] исследовали сезонные изменения температуры по данным записей сезонных изменений изотопов воды с высоким разрешением (рис. 2b), способным различать лето и зиму и показали, что наблюдаемые изменения можно объяснить изменениями максимальной летней инсоляции.

Изменение температуры Антарктического полуострова в голоцене представлено на рис. 2с по данным температурных реконструкции ледяных кернов: 1 – [EPICA, 2006] 2 – [EPICA, 2004].

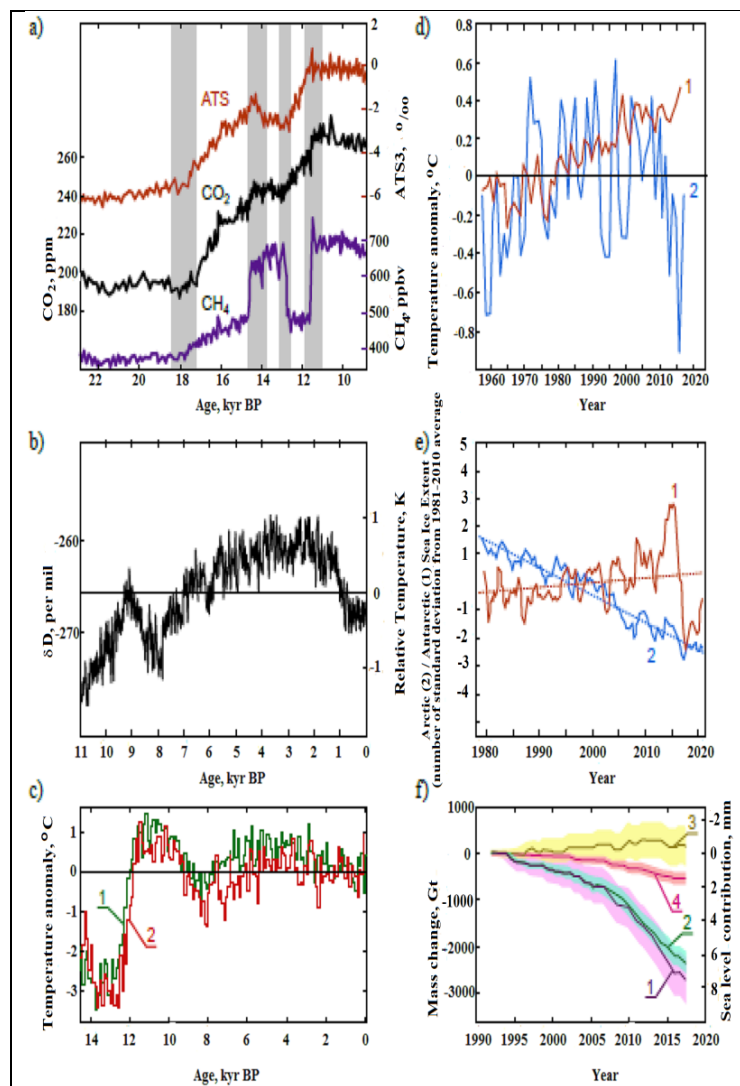


Рис. 2. Вариации климатических характеристик после окончания последнего оледенения:

а) Вариации температуры, углекислого газа и метана в Антарктических ледяных ядрах на интервале от максимума последнего оледенения, отступления ледников и перехода к Голоцену [Chowdhry Beeman et al., 2019].

б) Сезонная изменчивость изотопов воды δD (средние значения за 50 лет) и годовая температура Антарктиды в течение Голоцена [Jones et al., 2021]. Горизонтальная линия – средний уровень Голоцена.

с) Реконструкции температуры из ледяных кернов Антарктического полуострова (Восточная Антарктида): 1 – Земля Королевы Мод [EPICA, 2006], 2 – Купол С [EPICA, 2004].

д) Аномалии среднегодовой температуры воздуха в Южном полушарии [Jones et al., 2016]. Многолетняя изменчивость аномалии среднегодовой температуры воздуха в Южном полушарии (1) и средних арифметических значений аномалии среднегодовой температуры на антарктических станциях (2).

е) Изменение протяженности морского льда Антарктики (1) и Арктики (2) с 1979 г. [Parkinson, 2019]. Сплошные линии показывают 12-месячные скользящие средние значения, а пунктирные линии показывают общую тенденцию.

ф) Кумулятивные изменения массы ледяного щита (сплошные линии) и соответствующее изменение уровня моря: 1 – Antarctica. 2 – West Antarctica. 3 – East Antarctica. 4 – Antarctic Peninsula. [Shepherd et al., 2019]. Заштрихованные области – оценки неопределенности изменения в 1σ .

Рис. 2d характеризует изменчивость аномалии среднегодовой температуры воздуха в Южном полушарии (1) и средних арифметических значений аномалии среднегодовой температуры на антарктических станциях (2) в течение последних десятилетий [Jones et al., 2016]. Следует отметить, что отрицательные тенденции средних арифметических значений аномалии среднегодовой температуры (2) свидетельствуют о замедлении процесса потепления в Антарктиде.

На рис. 2е показана среднегодовая протяженность морского льда с 1979 по 2018 гг. в Антарктике (1) и Арктике (2) [Parkinson, 2019]. Из рисунка видно, что Арктический морской лед сокращался в последние пять десятилетий, в то время как антарктический морской лед сначала увеличивался, а примерно с 2015 г. следует уменьшение (сокращение) со скоростью, намного превышающей скорость, наблюдаемую в Арктике.

Основанные на спутниковых наблюдениях измерения изменений массы ледяных щитов (сплошные линии) с 1990 г. для четырёх ледяных кернов Антарктиды приведены на рис. 2ф [Shepherd et al., 2019]. Неопределенность изменения в 1σ заштрихована.

Таким образом, как показывает анализ, при рассмотрении долговременных тенденций изменения климата амплитуды изменений температуры климата Голоцена снижаются, площадь антарктического морского льда уменьшается, но остаются неясными дальнейшие тенденции их изменения. В то же время в последние годы увеличивается число сообщений об увеличении наводнений и засух, что требует более глубокого понимания причин изменяющихся во времени воздействий на окружающую среду, но этому препятствует недостаток имеющихся данных.

Широко обсуждаемое глобальное потепление в последние десятилетия могут привести к разрушению ледников Антарктиды и усилению активности вулканов, сохранявшихся подо льдом. Из анализа используемых данных по изменению температуры и CO₂ на стадии окончания Голоцена нельзя сделать однозначного вывода о тенденции их изменения на ближайшее будущее. Наблюдаемые в настоящее время изменения климата трудно укладываются в допускаемые рамки по результатам изучения изменений климата в прошлом. Например, крупный ледник, расположенный в западной части Антарктики, который лежит на морском дне, стремительно теряет устойчивость, пережил фазу «быстрого отступления» от шельфа за очень короткое время [Graham et al., 2022], быстро тает, что поднимает уровень Мирового океана.

Литература

- Bereiter B. et al. // *Geophysical Research Letters*. V. 42. P. 542–549. 2015.
- Chowdhry Beeman J. et al. // *Clim. Past*. V. 15. P. 913–926. 2019.
- Crowley T.J. and Burke K.C. (Eds) // *Tectonic Boundary Conditions for Climatic Reconstructions*. – Oxford University Press, New York, 285 pp. 1998.
- Crowley T.J. and Kim K-Y. // *Geophys. Res. Let.* V. 22(8). P. 933–936. 1995.
- EPICA Community Members // *Nature*. V. 429. P. 623–628. 2004.
- EPICA Community Members // *Nature*. V. 444. P. 195–198. 2006.
- Friedrich T. et al. // *Sci. Adv.* V. 2, e1501923 doi: 10.1126/sciadv.1501923, 2016.
- Graham et al. // *Nature Geoscience*. V.15. P. 706–713. 2022.
- Jones P.D. et al. / In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge, Tenn., U.S.A. 2016. doi: 10.3334/CDIAC/cli.002.
- Jones T.R. et al. *Physical Sciences – Preprint*. 32 p. doi.org/10.21203/rs.3.rs-564788/v1. 2021.
- Kominz M.A. et al. // *Basin Research*. V. 20. P. 211–226. 2008.
- Lear C.H. et al. // *Journal of the Geological Society*. V. 178(1), jgs2020–239, <https://doi.org/10.1144/jgs2020-239>.
- Lisiecki L. and Raymo M.E. // *Paleoceanography*. V. 20, PA1003, <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>. 2005.
- McKay R.M. et al. // *Phil. Trans. R. Soc. V. A* 374: 20140301. 2016.
- Pagani M. et al. // *Science*. V. 309. No. 5734. P. 600–603, 2005.
- Parkinson C.L. // *PNAS*. July, pp. 1–10. doi:10.1073/pnas.1906556116.
- Parrenin F. et al. // *Science*. V. 339. P. 1060–1063. 2013.
- Shepherd A., Gilbert L., Muir A.S. // *GRL*. V. 46, Issue 14. P. 8174–8183. 2019.
- Zachos J.C., Dickens G.R., Zeebe R.E. // *Nature*. V. 451. P. 279–283. 2008.