

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.578.42

doi:10.15356/2076-6734-2017-1-5-9

Вариации скорости снегонакопления в Центральной Антарктиде за последние 250 лет

© 2017 г. А.А. Екайкин^{1,2*}, Д.О. Владимирова¹⁻³, В.Я. Липенков¹

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;
²Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;
³Центр льда и климата, Университет Копенгагена, Копенгаген, Дания
 *ekaykin@aari.ru

Variations of snow accumulation rate in Central Antarctica over the last 250 years

A.A. Ekaykin^{1,2*}, D.O. Vladimirova¹⁻³, V.Ya. Lipenkov¹

¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia;
²Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;
³Center for Ice and Climate, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark
 *ekaykin@aari.ru

Received November 8, 2016

Accepted December 29, 2016

Keywords: *Antarctica, ice cores, paleoclimate, snow accumulation rate, stable water isotopes.*

Summary

The present-day global climate changes, very likely caused by anthropogenic activity, may potentially present a serious threat to the whole human civilization in a near future. In order to develop a plan of measures aimed at elimination of these threats and adaptation to these undesirable changes, one should deeply understand the mechanism of past and present (and thus, future) climatic changes of our planet. In this study we compare the present-day data of instrumental observations of the air temperature and snow accumulation rate performed in Central Antarctica (the Vostok station) with the reconstructed paleogeographic data on a variability of these parameters in the past. First of all, the Vostok station is shown to be differing from other East Antarctic stations due to relatively higher rate of warming (1.6 °C per 100 years) since 1958. At the same time, according to paleogeographic data, from the late eighteenth century to early twenty-first one the total warming amounted to about 1 °C, which is consistent with data from other Antarctic regions. So, we can make a conclusion with high probability that the 30-year period of 1985–2015 was the warmest over the last 2.5 centuries. As for the snow accumulation rate, the paleogeographic data on this contain a certain part of noise that does not allow reliable concluding. However, we found a statistically significant relationship between the rate of snow accumulation and air temperature. This means that with further rise of temperature in Central Antarctica, the rate of solid precipitation accumulation will increase there, thus partially compensating increasing of the sea level.

Поступила 8 ноября 2016 г.

Принята к печати 29 декабря 2016 г.

Ключевые слова: *Антарктида, изотопный состав, ледяные керны, палеоклимат, снегонакопление.*

Современные изменения температуры воздуха и скорости накопления снега, полученные инструментальным путём на антарктической станции Восток, сопоставлены с палеоклиматическими реконструкциями за последние 250 лет. Показано, что период 1985–2015 гг., вероятно, был самым тёплым 30-летием за последние 2,5 века. Скорость снегонакопления положительно коррелирует с изменчивостью температуры воздуха – это показывает, что повышение температуры в будущем будет сопровождаться ростом количества снега, накапливаемого в Антарктиде, что частично компенсирует рост уровня Мирового океана. Вместе с ростом температуры воздуха на протяжении последних 50 лет имело место и увеличение количества осадков, однако являются ли современные значения скорости снегонакопления аномальными для последних 250 лет на основании имеющихся данных сказать трудно.

Введение

Изучение современных климатических изменений имеет не только научный, но и прикладной интерес ввиду исключительно сильного влияния окружающей среды на народное хозяйство и жизнь человека. Будущее человечества будет зависеть от соотношения скорости изменения параметров окружающей среды и быстроты нашей адаптации к этим изменениям. В связи с этим понимание механизмов современных изменений – важнейшая задача с точки зрения прогнозирования будущего состояния окружающей среды.

Один из аспектов современных глобальных изменений – повышение уровня Мирового океана в результате таяния ледников и теплового расширения воды. Наибольший вклад в изменение уровня океана могут внести Гренландия и Антарктида, так как именно там находится наибольшее количество континентального льда. И если роль Гренландии в современное повышение уровня океана не вызывает сомнений [1], то вклад Антарктиды оценить достаточно трудно ввиду больших неопределённостей в наших знаниях и величины аккумуляции, и величины абляции [2]. Также недостаточно изучен механизм обратных связей, усиливающих или ослабляющих влияние повышения температуры воздуха на баланс массы полярных ледников. В частности, рост температуры в Антарктике должен приводить к увеличению количества твёрдых осадков и частичной компенсации расхода массы на таяние [3]. В настоящей работе мы рассмотрим современные изменения температуры и скорости снегонакопления в Центральной Антарктиде на примере станции Восток и сопоставим их с более долгопериодными вариациями.

Методы и данные

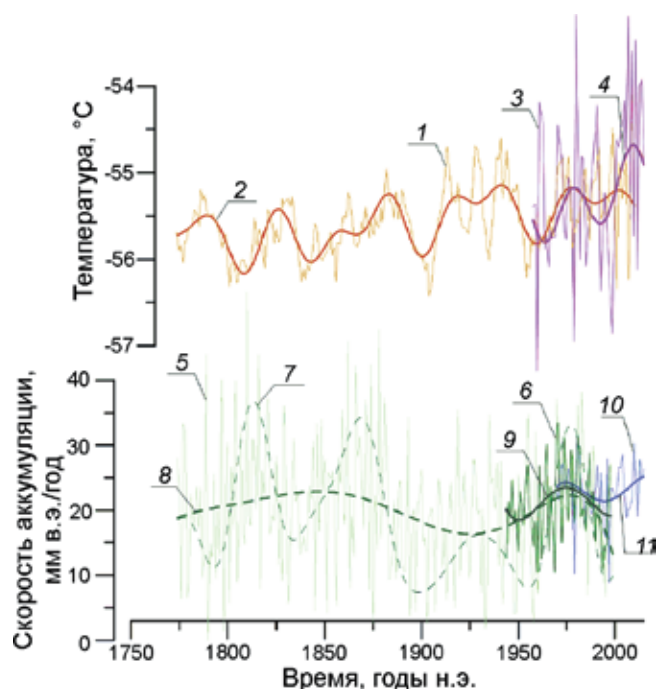
Станция Восток была открыта 16 декабря 1957 г., и с тех пор на ней непрерывно ведутся метеорологические наблюдения. Это – вторая (наряду со станцией Амундсен-Скотт) точка в Центральной Антарктиде, для которой имеются климатические ряды почти за 60-летний период. Ряд температуры доступен на сайте Арктического и Антарктического НИИ (<http://www.aagi>.

aq/default_ru.html, метеорология, сводная таблица). В 1970 г. на станции Восток был установлен снегомерный полигон, на котором выполняются ежегодные измерения баланса массы снежного покрова [4]. Полученный ряд – самый длинный, методически однородный инструментальный ряд снегонакопления в Центральной Антарктиде. В данной работе мы впервые представим ряд снегонакопления на Востоке, продлённый до 2015 г.

Со второй половины 1980-х годов на Востоке выполняется интенсивная программа гляциологических исследований, направленных на реконструкцию климатических изменений в этом районе за 200–300 лет (методика исследований подробно приведена в работе [5]). В настоящей статье мы представляем сводный ряд скорости снегонакопления и температуры воздуха за период 1774–1999 гг. по данным трёх глубоких шурфов и сводный ряд снегонакопления за период 1944–1998 гг. по данным восьми неглубоких шурфов. Температура воздуха реконструируется по изотопному составу (концентрации дейтерия и кислорода-18) снежных отложений [6]. Благодаря статистически значимой ($r = 0,66$) корреляции между сводным рядом изотопного состава снежных отложений и инструментально измеренной средней годовой температуры воздуха за общий период времени (1958–2010 гг.) появилась возможность вычислить изотопно-температурный калибровочный коэффициент, который равен 16,8‰ на 1 °C. На рисунке представлены все имеющиеся в наличии данные.

Ряд температуры демонстрирует заметное снижение амплитуды высокочастотных колебаний в первой половине ряда. Это – артефакт, не имеющий отношения к климатическим изменениям, а отражающий постепенное диффузионное сглаживание изотопных вариаций в нижней части снежной толщи. Кроме того, эти высокочастотные вариации представляют собой главным образом «стратиграфический шум», не несущий климатической информации [5]. Именно поэтому мы анализировали не оригинальные, а отфильтрованные (сглаженные) ряды.

Ряд снегонакопления, реконструированный по данным трёх глубоких шурфов, также характеризуется высоким уровнем шума. В этой статье рассматриваются два варианта осреднения: 1) фильтр, отсекающий колебания с периодом менее 27 лет (тонкий пунктир) и 2) полиноми-



Изменение температуры воздуха и скорости накопления снега в районе станции Восток за последние 250 лет.

1 – реконструированные значения средней годовой температуры воздуха в районе станции Восток по данным глубоких шурфов и снежных кернов (1774–1999 гг.); 2 – оригинальные данные, сглаженные 27-летним фильтром; 3 – инструментальные данные о температуре воздуха на станции Восток (1958–2015 гг.); 4 – те же данные, сглаженные 27-летним фильтром; 5 – сводные кривые скорости снегонакопления по данным гляциологических исследований в шурфах за 1774–1999 гг. (три шурфа); 6 – то же за 1944–1998 гг. (восемь шурфов); 7 – ряд 1774–1999 гг., сглаженный 27-летним скользящим фильтром; 8 – то же, сглаженное полиномиальной функцией четвертой степени; 9 – ряд 1944–1998 гг., аппроксимированный полиномиальной функцией четвертой степени; 10 – данные инструментальных наблюдений на снегомерном полигоне станции Восток (1970–2015 гг.); 11 – те же данные, аппроксимированные полиномиальной функцией четвертой степени

The variability of mean annual air temperature and snow accumulation rate in the vicinity of Vostok Station over the past 250 years.

1 – the reconstructed values of mean annual air temperature near Vostok station based on data from deep pits and shallow firn cores (1774–1999): original data; 2 – smoothed by 27-year filter; 3 – instrumental data on Vostok air temperature (1958–2015); 4 – the same data smoothed by 27-year filter; 5 – the stacked curves of snow accumulation rate based on glaciological data from snow pits for the period 1774–1999 (3 pits); 6 – the same for the period 1944–1998 (8 pits); 7 – the 1774–1999 series smoothed by 27-year filter; 8 – the same smoothed by polynomial function of fourth order; 9 – the 1944–1998 series approximated by a polynomial function of fourth order; 10 – the instrumental data on snow accumulation rate from Vostok snow-stake network (1970–2015); 11 – the same data approximated by a polynomial function of fourth order

альная аппроксимационная функция (жирный пунктир). В отличие от реконструированного ряда температуры, ряд скорости снегонакопления, напротив, обнаруживает большую амплитуду колебаний в первой половине ряда. Это также может быть методической погрешностью, связанной со стиранием стратиграфических различий в результате процессов метаморфизма, благодаря чему соседние слои могут слиться в один слой, имеющий большую толщину. Далее, когда первичная датировка снежной толщи корректируется в соответствии с абсолютной датировкой, выполненной по данным о залегании слоя снега, содержащего продукты известных вулканических извержений (в частности, слоя извержения вулкана Тамбора, датируемого 1816 г.), приходится добавлять некоторое количество «нулевых» (т.е. имеющих нулевую толщину) стратиграфических слоёв.

Мы также используем сводный ряд скорости снегонакопления, реконструированный по данным восьми неглубоких снежных шурфов и охватывающий период времени с 1944 по 1998 г. (см. рисунок). Размах ряда инструментальных данных снегонакопления, полученных на снегомерном полигоне, заметно ниже, чем реконструированных данных. Это связано с тем, что снегомерный полигон осредняет скорость снегонакопления по 79 точкам на площади 1 км², что сильно уменьшает случайную ошибку отдельных значений. За общий период времени (1970–1998 гг.) все три ряда показывают очень близкое среднее значение скорости снегонакопления (21,8 и 22,5 мм в.э./год по реконструированным рядам и 22,6 мм в.э./год по инструментальному ряду) и схожий характер межгодовой изменчивости, что подтверждает хорошее качество реконструкции снегонакопления.

Обсуждение и заключение

На протяжении последних 2,5 столетий, судя по данным рисунка, климат Центральной Антарктиды испытывал плавное потепление. За указанный период времени средняя годовая температура воздуха поднялась приблизительно на 1 °С. Такие же результаты получены и в предыдущих исследованиях [7] по другим районам Антарктиды. Потепление второй по-

ловины XX в. проявляется в Антарктиде крайне неравномерно. Если в районе Антарктического полуострова скорость потепления (до 3 °C за 100 лет) существенно выше, чем в среднем в Южном полушарии (около 0,6 °C за 100 лет), то многие станции, расположенные в Восточной Антарктиде (Халли, Сёва, Моусон, Кейси, Дюмон-д'Юрвиль, Амундсен-Скотт), не имеют значимого тренда или показывают отрицательный тренд. Береговые станции, находящиеся в секторе Земли Принцессы Елизаветы (Дейвис и Мирный), испытывают потепление со скоростью 0,4–0,5 °C за 100 лет (чуть меньше, чем Южное полушарие в целом). Станция Восток выделяется на этом фоне, демонстрируя потепление со скоростью 1,6 °C за 100 лет.

Совместные данные палеореконокструкций и инструментальных наблюдений, представленные на рисунке, впервые говорят, что период 1985–2015 гг. может быть самым тёплым тридцатилетием в районе станции Восток за последние 250 лет. Подобный вывод нуждается в проверке по данным других районов Центральной Антарктиды, но если он подтвердится, то это будет первое свидетельство проявления современного глобального потепления в этом регионе нашей планеты.

Данные о скорости снегонакопления из-за наличия значительного «шума» (малого отношения сигнала к шуму) не позволяют однозначно судить о вековом тренде изменения этого параметра. С одной стороны, наибольшие значения аккумуляции (около 30 мм в.э./год и выше) наблюдались в начале XIX в. и с тех пор значения скорости накопления снега несколько снизились. С другой стороны, наиболее надёжный сводный ряд скорости снегонакопления по всей Антарктиде [8] свидетельствует в пользу общего увеличения приходной части баланса массы Антарктиды на протяжении последних двух веков.

Как было указано в разделе «Методы и данные», амплитуда колебаний значений снегонакопления в первой половине 250-летнего реконструированного ряда может быть завышена, т.е. сглаженные по 27 годам значения снегонакопления (см. рисунок) могут неадекватно отражать изменчивость данной характеристики в прошлом. Сравнение реконструированного ряда, аппроксимированного полиномиальной функцией, с инструментальным рядом снегонакопления позволяет предположить, что скорость аккумуляции

снега на станции Восток в начале XXI в. — самая значительная за последние 2,5 века.

Сглаженные кривые реконструированных значений температуры и скорости снегонакопления обнаруживают заметную ковариацию как минимум на протяжении последних 150 лет: чем выше температура, тем больше скорость снегонакопления. Наиболее чётко эта зависимость проявляется в период после 1950 г., для которого есть надёжные данные по скорости снегонакопления: похолоданиям начала 1950-х и начала 1990-х годов соответствовало снижение скорости аккумуляции снега, а потеплениям 1970-х и 2000-х годов, напротив, увеличение снегонакопления. Инструментальные изменения подтверждают статистически значимую связь ($r = 0,33 \pm 0,15$) между этими двумя параметрами за период 1970–2015 гг. Вместе с тем, по имеющимся у нас данным, нельзя сделать однозначный вывод, является ли повышенная скорость накопления снега в начале XXI в. аномально большой на фоне последних 250 лет или нет.

Выполненные исследования позволяют сделать несколько основных выводов:

1) начиная с 1958 г. средняя годовая температура воздуха на станции Восток увеличивалась со скоростью 1,6 °C за 100 лет, что существенно превышает среднюю скорость потепления в Южном полушарии. Большая часть этого потепления имела место в 2000-х годах;

2) сопоставляя современные инструментальные данные со сведениями о температуре воздуха, реконструированными с помощью палеогеографических методов, с большой долей вероятности можно утверждать, что период 1985–2015 гг. был самым тёплым тридцатилетием в Центральной Антарктиде (район станции Восток) за последние 250 лет, что свидетельствует о проявлении современного глобального потепления и в этом регионе планеты;

3) обнаружена значимая положительная связь между температурой воздуха и скоростью снегонакопления в Центральной Антарктиде. Это говорит о том, что скорость отложения снега на поверхности Антарктиды с большой долей вероятности будет возрастать в ходе будущего потепления, частично компенсируя повышение уровня Мирового океана;

4) вместе с тем имеющиеся у нас данные не позволяют однозначно утверждать, что снегонако-

пление в период 1985–2015 гг. аномально велико на фоне последних 2,5 столетий. Вывод о росте скорости снегонакопления в современную эпоху в Центральной Антарктиде должен быть подтверждён более надёжными реконструкциями скорости снегонакопления в районе станции Восток и в других районах Восточной Антарктиды.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Русского географического общества (грант № 06/2016-И).

Acknowledgments. This work was made under finance support of the Russian Geographical Society (grant № 06/2016-И).

Литература

1. Rignot E., Velicogna I., van den Broeke M.R., Monaghan A., Lenaerts J.T.M. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise // *Geophys. Research Letters*. 2011. V. 38. № 5. doi: 10.1029/2011GL046583.
2. Palerme C., Kay J.E., Genthon C., l'Ecuyer T., Wood N.B., Claud C. How much snow falls on the Antarctic ice sheet? // *The Cryosphere*. 2014. V. 8. P. 1577–1587.
3. Frieler K., Clarke P.U., He F., Buizert C., Reese R., Ligtenberg S.R.M., van den Broeke M.R., Winkelmann R., Levermann A. Consistent evidence of increasing Antarctic accumulation with warming // *Nature Climate Change*. 2015. V. 5. P. 348–352.
4. Барков Н.И., Липенков В.Я. Накопление снега в районе станции Восток, Антарктида, 1970–1992 гг. // МГИ. 1996. Вып. 80. С. 87–88.
5. Ekaykin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Y., Shibaev Y.A. Multiple climate shifts in the southern hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies // *Annals of Glaciology*. 2014. V. 55. P. 259–266.
6. Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии / Ред. В.Я. Липенков. Санкт-Петербург: ААНИИ, 2016. 64 с.
7. Jones J.M., Gille S.T., Goosse H., Abram N.J., Canziani P.O., Charman D.J., Clem K.R., Crosta X., de Lavergne C., Eisenman I., England M.H., Fogt R.L., Frankcombe L.M., Marshall G.J., Masson-Delmotte V., Morrison A.K., Orsi A.J., Raphael M.N., Renwick J.A., Schneider D.P., Simpkins G.R., Steig E.J., Stenni B., Swingedouw D., Vance T.R. Assessing recent trends in high-latitude Southern Hemisphere surface climate // *Nature Climate Change*. In press.
8. Frezzotti M., Scarchilli C., Becagli S., Proposito M., Urbini S. A synthesis of the Antarctic surface mass balance during the last 800 yr // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 303–319.

References

1. Rignot E., Velicogna I., van den Broeke M.R., Monaghan A., Lenaerts J.T.M. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys. Research Letters*. 2011, 38 (5). doi: 10.1029/2011GL046583.
2. Palerme C., Kay J.E., Genthon C., l'Ecuyer T., Wood N.B., Claud C. How much snow falls on the Antarctic ice sheet? *The Cryosphere*. 2014, 8: 1577–1587.
3. Frieler K., Clarke P.U., He F., Buizert C., Reese R., Ligtenberg S.R.M., van den Broeke M.R., Winkelmann R., Levermann A. Consistent evidence of increasing Antarctic accumulation with warming. *Nature Climate Change*. 2015, 5: 348–352.
4. Barkov N.I., Lipenkov V.Ya. Snow accumulation in the region of Vostok station, Antarctica, over 1970–1992. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1996, 80: 87–88. [In Russian].
5. Ekaykin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Y., Shibaev Y.A. Multiple climate shifts in the southern hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies. *Annals of Glaciology*. 2014, 55: 259–266.
6. Ekaykin A.A. Stable isotopes of water in glaciology and palaeogeography. Ed. V.Ya. Lipenkov. Sankt-Petersburg: AARI, 2016: 64 p.
7. Jones J.M., Gille S.T., Goosse H., Abram N.J., Canziani P.O., Charman D.J., Clem K.R., Crosta X., de Lavergne C., Eisenman I., England M.H., Fogt R.L., Frankcombe L.M., Marshall G.J., Masson-Delmotte V., Morrison A.K., Orsi A.J., Raphael M.N., Renwick J.A., Schneider D.P., Simpkins G.R., Steig E.J., Stenni B., Swingedouw D., Vance T.R. Assessing recent trends in high-latitude Southern Hemisphere surface climate. *Nature Climate Change*. In press.
8. Frezzotti M., Scarchilli C., Becagli S., Proposito M., Urbini S. A synthesis of the Antarctic surface mass balance during the last 800 yr. *The Cryosphere*. 2013, 7: 303–319.