

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА АНТАРКТИДЫ ЗА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Касушкин Н. А.¹⁾, Шлендер Т. В.^{1,2)}

¹⁾Факультет географии и геоинформатики БГУ,

²⁾Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: geo.kasushki@bsu.by

В данной работе проводится обзор исследований по изменению климата на территории Антарктиды за инструментальный период наблюдений при помощи данных, полученных с начала и середины 20 века с полярных станций Антарктиды. Раскрываются различные факторы и причины потепления или похолодания климата в различных частях Антарктиды. Приводятся оценки связи метеорологических величин с индексами циркуляции Южного полушария.

Ключевые слова: Антарктида; климатология; Южная кольцевая мода; потепление; изменение климата

CLIMATE CHANGE IN ANTARCTICA DURING THE INSTRUMENTAL PERIOD OF RESEARCH

Kasushkin N. A. Schlender T. V.

¹⁾Faculty of Geography and Geoinformatics BSU,

*²⁾National Ozone Monitoring Research Center BSU,
Minsk, Republic of Belarus, e-mail: geo.kasushki@bsu.by*

This paper reviews studies on climate change in Antarctica over the instrumental observation period using data obtained from the early and mid-20th century from polar stations in Antarctica. Various factors and causes of climate warming or cooling in different parts of Antarctica are revealed. Estimates of the relationship between meteorological quantities and circulation indices of the Southern Hemisphere are provided.

Keywords: Antarctica; climatology; Southern Annular Mode; warming; climate change

Климатическая система Антарктики изменяется в зависимости от временных масштабов – от орбитальных (десятки до сотен тысяч лет), тысячелетних и полугодовых. По данным МГЭИК [1] климат полярных регионов имеет более быстрые темпы изменения по отношению к тропическим или умеренным широтам.

Вопрос о том, потеплела или остыла Антарктика в целом за последние десятилетия рассматривался в ряде работ и имел разные выводы. Например, Рапер П. и его коллеги [2] попытались определить среднегодовую темпе-

ратуру Антарктического континента путем вычисления средневзвешенного значения по площади данных станции и обнаружили, что в 1957-1982 гг. наблюдалось потепление на $0,29\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Доран П. и другие [3] вывели годовые и сезонные тренды температуры (1966-2000 гг.) для Антарктики, и определили, что за этот период произошло общее похолодание всего континента. Однако Тернер О. [4] утверждал, что невозможно вывести тенденцию для всего континента, поскольку:

- Данные с различных станций были объединены для создания единого временного ряда;
- Метаданные станций предоставлены не были, поэтому неясно, когда были перемещены станции и когда были введены новые приборы наблюдения;
- Часто не указывается, какой контроль качества проводился в ходе наблюдений;
- Неясно, каким образом были получены среднесуточные температуры. На некоторых станциях среднесуточное значение рассчитывается на основе трех- или шестичасовых синоптических наблюдений, тогда как на других станциях оно берется как среднее значение суточных максимальных и минимальных температур.

Поэтому научный комитет по антарктическим исследованиям (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR) учредил новый проект в конце 1990-х гг., где бы были собраны и обработаны по единой методике все метеоданные полярных станций Антарктики (Reference Antarctic Data for Environmental Research, READER [4]), чтобы в дальнейшем использовать их в исследованиях изменения климата южной полярной зоны.

В данной работе будут представлены обзоры научных результатов по исследованию изменения климата Антарктиды на основе инструментальных данных.

В работе [5] изменчивость приземных температур воздуха в масштабе всего континента оценивалась по среднегодовым температурным аномалиям за каждые 5 лет (относительно периода 1981-2010 гг.). Для станций Антарктического полуострова характерна высокая степень изменчивости отклонений приземных температур воздуха (рис. 1а). До 1960-х годов наблюдается значительный отрицательный тренд значений температур воздуха на двух станциях – Оркады и Вернадский. С начала 1970-х виден рост отклонений температур воздуха на всех станциях полуострова, который достигает положительных значений ближе к 2020 году, что связывают с положительным ростом Южной кольцевой моды (Southern annular mode, SAM) [6]. В некоторые годы наблюдались очень локальные аномалии температуры, такие как очень теплые условия на станции Марамбио и Эсперансе в 2016 году, которые не были зарегистрированы на других станциях

полуострова. Такие большие годовые аномалии температур воздуха на этих двух станциях были результатом очень теплой зимы, когда сильные юго-западные ветры уносили морской лед с относительно небольшой территории северо-западной части моря Уэдделла вокруг этих станций.

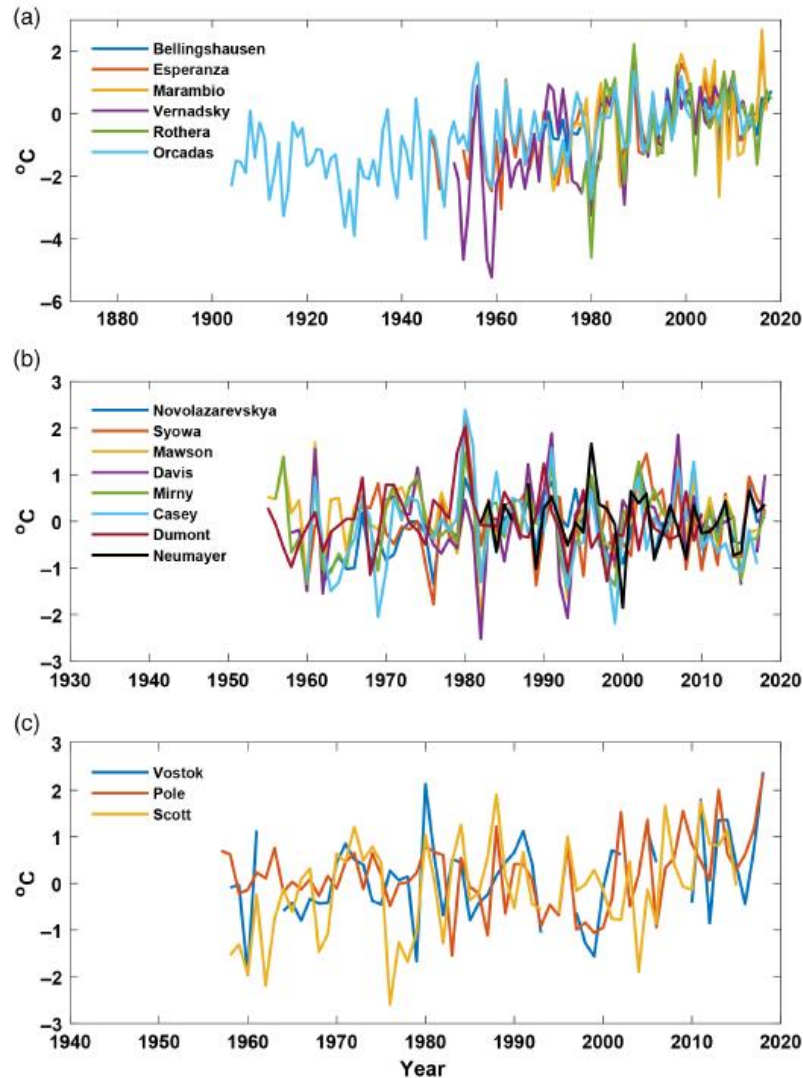


Рис. 1. Среднегодовые отклонения приземных температур воздуха различных станций Антарктиды, разделенные по регионам материка: а – Антарктический полуостров, б – Восточная Антарктида, с – внутриконтинентальная зона и ледяной шельф Росса [5]

Экстремально высокие зимние температуры воздуха (таблица) на Антарктическом полуострове (станции Марамбио, Ротера, Вернадский – тренды $+0,26^{\circ}\text{C}$, $+0,83^{\circ}\text{C}$ и $+0,89^{\circ}\text{C}$ соответственно) связаны с отрицательными значениями атмосферного давления (развитием циклонов) (рис. 2) и аномалиями геопотенциальной высоты верхнего уровня над морем Беллинсгаузена, что, в свою очередь, может быть связано с изменчивостью индекса ЭНЮК (Эль-Ниньо-Южное колебание).

Годовые и сезонные тренды приземных температур воздуха для станций Антарктиды за весь период их наблюдений [5]

Station	Temperature trend ($^{\circ}\text{C decade}^{-1}$)					Period
	Annual	Spring	Summer	Autumn	Winter	
Novolazarevskya	+0.13 ± 0.09	+0.21 ± 0.16	+0.06 ± 0.12	0.04 ± 0.17	+0.24 ± 0.24	1961–2018
Syowa	+0.03 ± 0.13	+0.03 ± 0.18	+0.04 ± 0.11	-0.08 ± 0.20	+0.10 ± 0.26	1957–1961, 1967–2018
Mawson	-0.05 ± 0.10	+0.10 ± 0.14	-0.08 ± 0.09	-0.12 ± 0.18	+0.01 ± 0.23	1954–2018
Davis	+0.05 ± 0.14	+0.15 ± 0.19	+0.06 ± 0.10	-0.06 ± 0.26	-0.04 ± 0.27	1957–1964, 1969–2018
Mirny	+0.00 ± 0.10	+0.15 ± 0.16	-0.03 ± 0.11	-0.11 ± 0.20	+0.05 ± 0.22	1956–2018
Vostok	+0.15 ± 0.13	+0.31 ± 0.20	+0.11 ± 0.15	+0.01 ± 0.24	+0.11 ± 0.32	1958–2018
Casey	+0.00 ± 0.16	+0.12 ± 0.18	-0.06 ± 0.09	+0.00 ± 0.24	-0.03 ± 0.28	1959–2018
Dumont d'Urville	-0.02 ± 0.10	+0.14 ± 0.14	+0.00 ± 0.11	-0.27 ± 0.16	-0.00 ± 0.24	1956–2018
Scott Base	+0.22 ± 0.15	+0.39 ± 0.25	+0.08 ± 0.13	+0.12 ± 0.27	+0.16 ± 0.30	1957–2018
Rothera	+0.44 ± 0.33	+0.46 ± 0.42	+0.02 ± 0.15	+0.53 ± 0.31	+0.83 ± 0.67	1977–2018
Faraday/Vernadsky	+0.46 ± 0.15	+0.30 ± 0.17	+0.16 ± 0.08	+0.47 ± 0.19	+0.89 ± 0.32	1951–2018
Bellingshausen	+0.17 ± 0.15	+0.03 ± 0.17	-0.02 ± 0.10	+0.26 ± 0.18	+0.35 ± 0.34	1969–2018
Esperanza	+0.29 ± 0.13	+0.19 ± 0.17	+0.29 ± 0.09	+0.36 ± 0.23	+0.21 ± 0.26	1945–2018
Marambio	+0.34 ± 0.25	+0.15 ± 0.38	+0.22 ± 0.18	+0.63 ± 0.50	+0.26 ± 0.52	1971–2018
Orcadas	+0.19 ± 0.06	+0.18 ± 0.08	+0.14 ± 0.03	+0.19 ± 0.09	+0.29 ± 0.13	1903–2018
Neumayer	-0.04 ± 0.20	+0.20 ± 0.39	+0.03 ± 0.26	-0.18 ± 0.40	-0.27 ± 0.52	1982–2018
Amundsen-Scott	+0.09 ± 0.10	+0.21 ± 0.22	+0.11 ± 0.19	+0.09 ± 0.19	-0.01 ± 0.25	1957–2018

Изменчивость фазы SAM играет большую роль в контроле температур на станциях вокруг побережья Восточной Антарктиды. Все восточно-антарктические станции имеют гораздо меньшую межгодовую изменчивость температуры по сравнению со станциями на полуострове, где изменчивость морского льда может усиливать аномалии атмосферной циркуляции. Вокруг побережья Восточной Антарктиды морской лед большую часть года простирается далеко к северу от побережья. События ЭНЮК могут привести к усилению меридиональной структуры вокруг побережья Восточной Антарктиды, что может вызвать различия в аномалиях температур воздуха между бережными станциями – Сьовой, Новолазаревской и Моусон/Дэвис. Станция Моусон отличается отрицательными трендами почти во все сезоны, а станция Новолазаревская показывает наибольшие тренды роста температуры воздуха (+0,24 $^{\circ}\text{C}$ зимой и +0,13 $^{\circ}\text{C}$ годовая). Однако, несмотря на более позитивные данные SAM за последние десятилетия, масштабного похолодания на станциях Восточной Антарктики не наблюдалось. Причины этого все еще неясны, но влияние более позитивного SAM может быть замаскировано радиационными эффектами, увеличением концентрации парниковых газов или отсутствие охлаждения может быть результатом региональных изменений атмосферной циркуляции, например, зональной асимметрии, связанной с тропической изменчивостью.

В работе [7] показаны тренды приземных температур воздуха для станций Молодежная и района базирования Белорусской полярной станции, где установлено, что незначительное похолодание 1980–1990-х компенсировалось потеплением в период 1998–2017 гг. Значения трендов составляли от $-0,1$ до $0,2$ °C/10 лет. Потепление 1998–2017 гг. в большей степени коснулось юго-восточной части исследуемой территории Земли Эндерби.

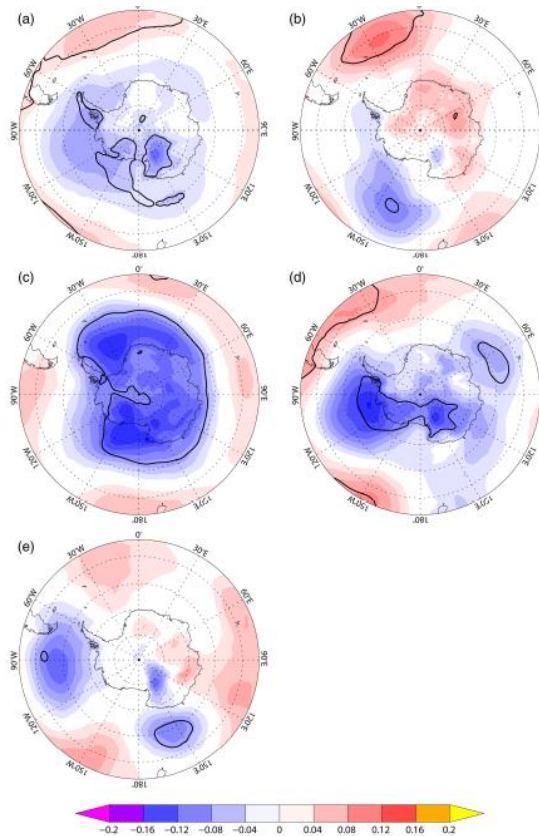


Рис. 2. Тренды приземного давления воздуха в Антарктике: (а) годовой, (b) весна, (c) лето, (d) осень (e) зима [5]

Межгодовая изменчивость среднегодовых и сезонных температур на станции Восток столь же велика. Температуры в течение сезона особенно чувствительны к глубине среднетропосферного вихря. Колебания температуры на станции Амундсен-Скотт также велики зимой, но также имеют большую изменчивость весной. Станция СкоттБейс расположена к западу от полюса, и, как следствие, ее годовая и сезонная изменчивость температуры больше, чем на большинстве прибрежных станций Восточной Антарктики. Изменчивость значений покрытия моря льдом оказывает незначительное прямое влияние на температуры на станциях плато. Годовые тренды на всех станциях высокогорного плато (Амундсен-Скотт, Восток)

также имеют положительный тренд температур воздуха на протяжении всех сезонов.

Безусловно, самые большие положительные отклонения, зафиксированные арктическими станциями за последние десятилетия, произошли на севере Антарктического полуострова, где во второй половине 20 века наблюдалось заметное потепление, за которым последовало статистически значимое похолодание в первом десятилетии 21 века. Низкое давление над морем Амудсена сыграло большую роль в стимулировании изменений климата на Антарктическом полуострове, изменив меридиональную составляющую ветра, которая, в свою очередь, изменила плотность льда и, следовательно, поток тепла из океана. Также вокруг Антарктического полуострова долгосрочный переход значений SAM в положительную фазу и увеличение силы западных ветров оказали значительное влияние на рост температур воздуха. В последние десятилетия потеря стратосферного озона способствовала положительной тенденции в индексе SAM в течение летнего периода. Более сильные западные ветры привели к тому, что относительно теплые воздушные массы пересекли высокий орографический барьер Антарктического полуострова и достигли шельфовых ледников. Воздействие низкого давления над морем Амудсена также повлияло на температуру в южных районах Моря Росса, на базе СкоттБейс произошло потепление, которое не было зафиксировано на других станциях у побережья Восточной Антарктиды. Подобные процессы объясняются десятилетней изменчивостью тропической части Тихого океана, в то время как похолодание у побережья Восточной Антарктиды связано со сдвигом SAM в положительную фазу, что уменьшило поток тепла в направлении полюса и способствовало небольшим температурным тенденциям за последние годы.

Библиографические ссылки

1. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2019. <https://www.ipcc.ch>
2. Raper, S.C., Wigley, T.M., Jones, P.D. and Salinger, M.J. (1984) Variations in surface air temperatures: Part 3. The Antarctic, 1957–1982. *Monthly Weather Review*, 112, 1341–1353.
3. Doran P.T., Prisco J.C., Lyons W.B., Walsh J.E., Fountain A.G., McKnight D.M., Moorhead D.L., Virginia R.A., Wall D.H., Clow G.D., Fritsen C.H., McKay C.P., Parsons A.N. 2002. Antarctic climate cooling and terrestrial ecosystem response. *Nature* 415: 517–520
4. Turner, J., Colwell, S.R., Marshall, G.J., Lachlan-Cope, T.A., Carleton, A.M., Jones, P.D., Lagun, V., Reid, P.A. and Iagovkina, S. (2004) The SCAR READER project: towards a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. *Journal of Climate*, 17, 2890–2898.

5. Turner J., Marshall G. J., Clem K., Colwell S., Phillips T., Lu H. Antarctic temperature variability and change from station data // *International Journal of Climatology*. - 2019. - С. 1-22.

6. Steig E.J., Schneider D.P., Rutherford S.D., Mann M.E., Comiso J.C., Shindell D.T. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year // *Nature*. 2009. V. 457. № 7228. С. 459–462.

7. Саливончик С.В., Какарека С.В. Анализ трендов климатических показателей по данным наземных метеонаблюдений и+ реанализа на Земле Эндерби, Восточная Антарктика // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022. Т. 68. № 2. С. 142–159.