

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-142-159>
УДК 551.583



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Анализ трендов климатических показателей по данным наземных метеонаблюдений и реанализа на Земле Эндерби, Восточная Антарктика

С.В. Саливончик, С.В. Какарека*

Государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь

**salivonchik@yahoo.co.uk*

Резюме

В работе исследуются наличие и направленность климатических изменений на Земле Эндерби, Восточная Антарктика, где с 1963 по 1999 г. на научной станции Молодежная (сейчас летняя полевая база РАЭ) функционировала единственная метеорологическая станция сети ВМО, а в настоящее время установлена автоматическая метеорологическая станция.

Проанализированы тренды температуры приземного слоя воздуха, скорости и направления ветра за период с середины 1960-х гг. по настоящее время. В качестве исходных данных использованы результаты наземных наблюдений на станции Молодежная, а также ряды реанализа, которые позволили восполнить инструментальные ряды и оценить динамику характеристик температуры и ветра для последних десятилетий.

В качестве исходных использовались месячные значения климатических параметров, но для характеристик ветра, представленных в виде V и U компонент вектора скорости, брались срочные значения, по которым оценивались среднемесячные значения скоростей и распределения ветра по направлениям.

Из различных систем реанализа путем сопоставления с наземными наблюдениями были выбраны ряды, которые показали наибольшее сходство в динамике исследуемых климатических характеристик. Отмечено хорошее согласование температурных рядов наблюдения на метеостанции Молодежная с рядами реанализа UDel_AirT, ERA5 и GISS. Связь между рядами наблюдений ветра менее тесная, несколько лучше динамику скорости ветра передают ряды реанализа ERA5.

По анализу многолетней динамики среднегодовых и среднемесячных температур в районе Земли Эндерби тенденция к потеплению статистически не подтверждена, тем не менее отмечено постепенное увеличение количества месяцев в году с положительной динамикой температуры. Из анализа характеристик ветра статистически значимым признан лишь рост среднегодовой скорости ветра с интенсивностью 0,1–0,3 м/с/10 лет.

Ключевые слова: Антарктика, климатические тренды, ряды реанализа, скорость и направление ветра, станция Молодежная, температура воздуха.

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-142-159>.

Поступила 29.04.2022

После переработки 14.06.2022

Принята 16.06.2022

Analysis of trends of meteoroclimatic characteristics at Enderby Land, East Antarctica based on land observations data and reanalysis

Svetlana V. Salivonchyk*, Sergey V. Kakareka

Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus

*salivonchyk@yahoo.co.uk

Summary

The article studies the presence and possible direction of climate change in Enderby Land, East Antarctica, where from 1963 to 1999, the only meteorological station of the WMO network operated at the Molodezhnaya research station (now the summer field base of the RAE), and now an automatic meteorological station has been installed.

The trends in surface air temperature, wind speed and direction for the period from the mid-1960s to the present have been analyzed. As initial data, we used the results of ground-based observations at the Molodezhnaya station, as well as reanalysis datasets, which made it possible to complete the instrumental series and evaluate the dynamics of temperature and wind characteristics for the last decades.

Monthly values of climatic parameters were used as initial values, but for wind characteristics presented as the V and U components of the speed vector, single values were taken, according to which the average monthly wind speeds and wind distributions in directions were estimated.

From different reanalysis systems, by comparison with ground-based observations, series were selected that showed the greatest similarity in the dynamics of the climatic characteristics studied. Good agreement was found between the temperature series of observations at the Molodezhnaya meteorological station and the datasets UDEL_AirT, ERA5, and GISS. The correlation between the wind observation series is less strong; ERA5 reanalysis data shows the wind speed dynamics slightly better.

According to the analysis of the long-term dynamics of average annual and monthly temperatures in the region of Enderby Land, the warming trend has not been statistically confirmed, however, a progressive increase in the number of months of the year with positive temperature dynamics has been noted. Based on the analysis of wind characteristics, it is shown that only an increase in average annual wind speeds of 0.1–0.3 m/s/10 years is statistically significant.

Keywords: Antarctica, air temperature, climate trends, Molodezhnaya station, reanalysis, wind speed and direction.

For Citation: Salivonchyk S.V., Kakareka S.V. Analysis of trends of meteoroclimatic characteristics at Enderby Land, East Antarctica based on land observations data and reanalysis. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 142–159. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-142-159>.

Received 29.04.2022

Revised 14.06.2022

Accepted 16.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Проблема климатических изменений в Антарктическом регионе в последнее время вызывает серьезную обеспокоенность мирового сообщества и стала предметом рассмотрения в ряде крупных работ, обзоров, докладов, в частности Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [1–6 и др.].

Согласно выводам [3], климат высоких широт более изменчив в сравнении с тропическими или средними, и за последние несколько миллионов лет он значительно менялся под воздействием широкого спектра условий. При этом отделить естественную изменчивость климата от антропогенных воздействий чрезвычайно сложно, так как период инструментальных наблюдений короток по сравнению с историей континента. По мнению [7], некоторые части Антарктиды сталкиваются с самыми быстрыми темпами изменения климата на планете, но наблюдаемые в Антарктике уровни антропогенных изменений невелики по сравнению с естественными масштабами динамических

процессов, и поэтому их сложно вычлениить. Чаще всего наблюдаемая в последние десятилетия динамика объясняется изменениями циркумполярного вихря Южного полушария и усилением летом и осенью западных ветров, которые связаны с падением давления вдоль побережья Антарктики и его ростом в средних широтах [1, 8].

Отмечается, что потепление на континенте в последние десятилетия все более очевидно, но в первую очередь касается Западной Антарктики. В восточной части континента скорость климатических изменений существенно ниже [9, 10]. Об этом свидетельствуют и регулярно обновляемые данные Национального центра данных по снегу и льду, содержащие сведения и многолетние обобщения по площадям и другим характеристикам морского и континентального льда (<https://nsidc.org/data/>). Однако все чаще стала появляться информация об изменениях, затрагивающих восточную часть региона. Так, сообщается о быстром отступлении морского льда у берегов Восточной Антарктиды, которое приводит к потеплению поверхности у побережья [11], о возрастании сухости в регионе, о которой свидетельствуют изменения в растительности [12]. В то же время другие данные говорят о приросте ледяной массы в отдельных частях Восточной Антарктики [13, 14].

Целью данного исследования является анализ наличия и направленности климатических изменений на Земле Эндерби. Земля Эндерби — часть Восточной Антарктики, прибрежная часть которой простирается от ледника Шиннан (67° 55' ю. ш. 44° 38' в. д.) до залива Уильяма Скорсби (67° 55' ю. ш. 44° 38' в. д.) [15]. На этой территории вдоль побережья имеются 7 антарктических оазисов — участков суши, свободных ото льда, общей площадью более 100 км². На двух из них, Молодежный и Вечерний, объединяемых общим названием оазис Холмы Тала, с 1962 г. функционировала научная станция Молодежная. В оазисе Вечерний с конца 1970-х гг. располагалась полевая база для обслуживания аэродрома, а с декабря 2007 г. начала базироваться Белорусская сезонная антарктическая экспедиция (БАЭ).

Анализ динамики современных климатических показателей для этой территории ранее выполнялся в основном по данным наземных наблюдений. В настоящее время имеется несколько региональных обобщений, включающих описание этого района по изменению температуры и давления [1], средней скорости и частоты возникновения сильных ветров [16], параметров ветра в мезосфере / нижней термосфере [17] и пр.

По дистанционным данным в целом для Антарктики и ее отдельных регионов проанализированы тренды температуры [18] и скорости ветра [19]. Однако район Земли Эндерби в них детально не рассматривается. Специальные исследования на этой территории на основе данных реанализа не выполнялись.

Имеющиеся ряды наземных метеорологических наблюдений для исследуемой территории являются недостаточно полными. В районе Земли Эндерби расположена одна метеорологическая станция сети ВМО Молодежная (индекс 89542), которая на протяжении длительного периода являлась главной базой Советской антарктической экспедиции. Ближайшими к ней постоянными станциями из числа функционирующих являются Syowa (Япония) и Mawson (Австралия), удаленные соответственно на 297,9 км и 718,9 км, а также автоматические станции Relay Station (UW/Japan) и Amery (Австралия), расположенные на расстоянии 714,8 и 1004,1 км (<http://weather.gladstonefamily.net/site/89542>).

Систематические круглогодичные научные наблюдения на станции Молодежная выполнялись с января 1963 по июнь 1999 г., после чего она на длительный период была законсервирована. После перерыва Молодежная возобновила работу в качестве летней полевой базы РАЭ, на ней была установлена автоматическая метеорологическая станция (АМС) модели MAWS110 (Vaisala HydroMet™). В 2012 г. в районе базирования Белорусской антарктической экспедиции на горе Вечерняя также была

установлена АМС М-49М, которая работает только в летний сезон. Некоторое время АМС работала нестабильно, и первые данные были получены только в 2010 г., а относительно полный годовой ряд наблюдений — начиная с 2018 г.

Учитывая значительные пробелы в рядах наземных наблюдений за последние десятилетия, для анализа климатических изменений представляется целесообразным использовать ряды реанализа, которые являются результатом обобщения и обработки всех доступных метеорологических наблюдений с различных источников (данные станций ВМО и станций радиозондирования, спутниковые наблюдения, сводки воздушных и морских судов и т. д.) с использованием единой последовательной схемы/модели ассимиляции. Современные ряды реанализа позволяют существенно восполнить недостаток метеорологической информации для Земли Эндерби.

Предметом рассмотрения стали следующие климатические характеристики: температура приземного слоя воздуха, скорость и направление ветра. Задачи исследования включали: сопоставление данных различных систем реанализа с результатами инструментальных наблюдений на станции Молодежная; выявление рядов, наиболее согласованных по динамике исследуемых переменных; анализ их трендов за период с середины 1960-х гг. до настоящего времени.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач использовались массивы данных наземных наблюдений на станции Молодежная и различные модельные данные: ряды реанализа Национального центра прогноза окружающей среды США NCEP/NCAR Reanalysis 1 (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>) и NCEP-DOE Reanalysis 2 (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>), исторические ряды NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (20CR) (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.20thC_ReanV3.html), ряды Европейского центра среднесрочных прогнозов ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>), данные реанализа Университета штата Делавэр UDel_AirT (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.UDel_AirT_Precip.html) и анализа температуры поверхности Земли Института космических исследований НАСА имени Годдарда (GISS surface temperature analysis) (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>). Характеристики рядов приведены в таблице 1.

Анализировались данные месячного разрешения; по характеристикам ветра, которые для некоторых рядов представлены в виде V и U компонент вектора скорости, в качестве исходных использовались срочные значения. Для них первоначально были рассчитаны скорости и направления ветра и лишь затем получены среднемесячные осреднения.

Температурные ряды из системы реанализа NOAA-CIRES 20th Century были получены по последней версии 3 (20CRv3), а скорости ветра — по версии 2c (20CRv2c), где этот показатель представлен с месячным осреднением. Оценки среднемесячных скоростей по более поздней версии показали значимые различия между данными до 1981 г. и после, рассчитывавшимися по разным вариациям одной версии модели (3si и 3mo).

Данные наземных наблюдений на станции Молодежная получены из каталога данных Арктического и антарктического научно-исследовательского института Государственного научного центра Российской Федерации (<http://www.aari.aq>), где они представлены в виде среднемесячных значений метеорологических параметров. Некоторая часть информации наземных измерений, например по характеристикам ветра, получена из глобальной интегрированной базы данных ежечасных синоптических приземных наблюдений (ISD), доступ к которой предоставлен через FTP-сервер

Таблица 1

Table 1

Характеристика анализируемых в работе рядов реанализа для Земли Эндерби

Characteristics of the data of some reanalysis series for Enderby Land used in the work

Тип реанализа	Разрешение сетки	Полный временной ряд	Ближайшая точка сетки, дес. градус	Данные	Единица измерения	Уровень	Временное разделение
UDeI_AirT V5.01	0,5°×0,5°	1900–2017	S67,75 E45,75	Температура воздуха	°C	поверхностный слой	месяц
NCEP/NCAR 1	2,5°×2,5°	1948 — по наст. вр.	S67,50 E45,00	Температура воздуха на уровне значимости $\sigma = 0,995$	°C	поверхностный слой	месяц
	Gaussian grid	1948 — по наст. вр.	S67,6171 E45,00	U компонента вектора скорости ветра (u-wind)	м/с	10 м	4 раза в сутки
				V компонента вектора скорости ветра (v-wind)	м/с	10 м	4 раза в сутки
				Температура воздуха	К	2 м	месяц
ERA5	Global T62 Gaussian grid	1979 — по наст. вр.	S67,6171 E45,00	U компонента вектора скорости ветра (u-wind)	м/с	10 м	4 раза в день
				V компонента вектора скорости ветра (v-wind)	м/с	10 м	4 раза в день
	0,5°×0,5°	1979 — по наст. вр.	S67,75 E45,75	Температура воздуха	К	2 м	месяц
				Скорость ветра	м/с	10 м	месяц
20CRv3 20CRv2	1°×1°	1836–2015	S67,00 E46,00	U компонента вектора скорости ветра (u-wind)	м/с	10 м	1 час
	Global T62 Gaussian grid	1851–2014	S67,6171 E45,00	V компонента вектора скорости ветра (v-wind)	м/с	10 м	1 час
				Температура воздуха	К	2 м	месяц
				Скорость ветра	м/с	10 м	месяц
GISS	2,0°×2,0°	1880 — по наст. вр.	S67,00 E45,00	Аномалии температур, сглаженные окном 250 км	°C	поверхностный слой	месяц

Национального управления океанических и атмосферных исследований США (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa>).

Данные метеонаблюдений на станции Вечерняя использовались фрагментарно.

Предполагалось выводы о тенденциях изменения климатических показателей делать на основании не всех имеющихся рядов реанализа, а только максимально совпадающих с инструментальными рядами станции Молодежная. Выбор таких данных производился путем сопоставления хода среднемесячных и среднегодовых значений параметров.

Данные реанализа, как правило, распределены по регулярной сетке и описывают значения параметров в ее узлах. Пространственное разрешение, а также временной шаг и охват рядов отличаются (см. табл. 1). По каждому типу данных реанализа отбирался временной ряд значений для узла, расположенного ближе всего к станции Молодежная. Так как площади антарктических оазисов небольшие, а условия за их пределами существенно отличаются, то расстояние в несколько десятков километров может существенно сказаться на климатических характеристиках. Поэтому отклонения в абсолютных значениях рядов для разных точек считались допустимыми и большее внимание при выборе уделялось сопряженности временного хода.

Наиболее близкие к условиям станции Молодежная ряды реанализа анализировались на предмет наличия трендов, количества положительных и отрицательных аномалий, сравнивались их средние значения и экстремумы. Рассматривались тенденции, характерные как для отдельных точек, так и для всего района исследования, по совокупности рядов для множества узлов сетки.

В связи с разным временным охватом рядов наблюдения весь обеспеченный данными период был разделен на три последовательных, одинаковых по продолжительности (20 лет) и частично пересекающихся временных отрезка: 1964–1983, 1979–1998, 1998–2017. Они выделены с учетом срока начала наземных метеорологических наблюдений в исследуемом районе и разделены таким образом, чтобы были обеспечены наибольшим количеством рядов наблюдений, ни один из которых на протяжении обозначенного отрезка времени не прерывался. Для каждого из выделенных периодов расчеты линейного тренда выполнялись стандартным методом.

Дополнительно параметры тренда оценивались методом многократного скользящего выравнивания, который позволяет избежать влияния значений на концах временных рядов [20]. В этом случае линейные коэффициенты тренда определялись для полных рядов, без деления на отрезки; при сглаживании использовалась длина базы 15 лет. Значимость трендов оценивалась с использованием t-критерия Стьюдента.

Аномалии рядов оценивались относительно среднегодовых норм каждого ряда в отдельности, за исключением данных реанализа GISS, которые изначально являются рядами температурных аномалий. Для выполнения тренд-анализа температурные ряды GISS преобразовались к абсолютным значениям с использованием месячных норм для ст. Молодежная.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение рядов реанализа с данными инструментальных наблюдений на станции Молодежная

Результаты корреляционного анализа показали, что все сравниваемые температурные ряды хорошо согласуются с данными инструментальных наблюдений

на метеорологической станции Молодежная, наибольшее сходство было отмечено для рядов UDEL_AirT V5.01, GISS и ERA5 (табл. 2, рис. 1). В выбранном перечне температурные ряды ERA5 показали наиболее существенные различия в средних значениях, но по согласованности многолетнего хода температуры наиболее близки к инструментальному ряду, поэтому были приняты к рассмотрению.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции для приземной температуры воздуха и скорости ветра между данными стационарных наблюдений на станции Молодежная и рядами реанализа

Table 2

Correlation coefficients for surface air temperatures and wind speeds between stationary observations at the Molodezhnaya station and reanalysis series

Ряд данных	Температура воздуха, °C		Скорость ветра, м/с	
	среднемесячная	среднегодовая	среднемесячная	среднегодовая
UDEL_AirT V5.01	0,997 (n = 437)	0,972 (n = 35)		
NCEP/NCAR 1	0,962 (n = 246)	0,593 (n = 35)	0,801 (n = 433)	0,222 (n = 33)
NCEP-DOE 2*	0,987 (n = 246)	0,762 (n = 20)	0,814 (n = 245)	0,177 (n = 19)
ERA5*	0,997 (n = 437)	0,935 (n = 20)	0,936 (n = 245)	0,507 (n = 19)
20CRv2			0,790 (n = 433)	0,165 (n = 33)
20CRv3*	0,981 (n = 437)	0,732 (n = 35)		
GISS**	0,998 (n = 437)	0,963 (n = 35)		

n — длина отрезка времени сравниваемой пары рядов, месяцев для среднемесячных значений и лет — для среднегодовых; * — температурные ряды были пересчитаны в °C; ** — GISS ряды преобразованы с учетом месячных норм для ст. Молодежная

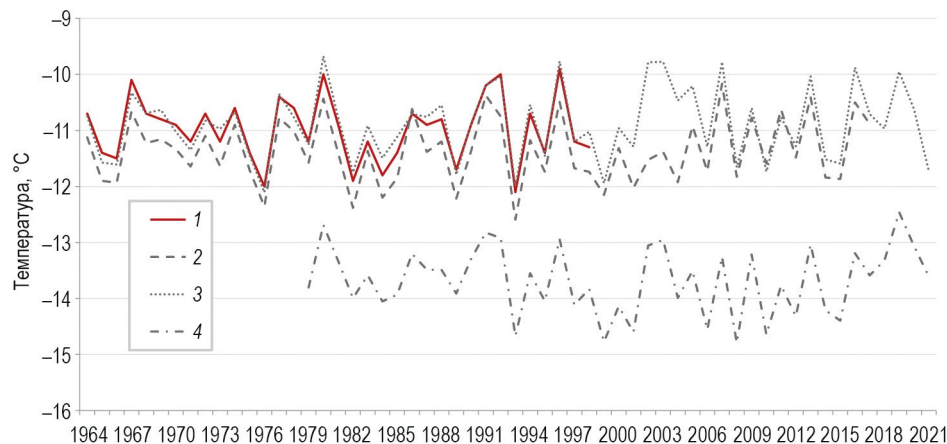


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры приземного воздуха по данным инструментальных наблюдений на станции Молодежная и рядам реанализа для ближайших к станции узлов сетки: 1 — ст. Молодежная; 2 — UDEL_AirT V5.01; 3 — GISS; 4 — ERA5.

Температурные ряды GISS преобразованы с учетом рассчитанных месячных норм для ст. Молодежная

Fig. 1. Changes in mean annual surface air temperatures according to instrumental observations at the Molodezhnaya station and reanalysis series for grid nodes closest to the station: 1 — Molodezhnaya station; 2 — UDEL_AirT V5.01; 3 — GISS; 4 — ERA5.

Temperature series GISS are converted taking into account monthly norms for the Molodezhnaya station

По характеристикам скоростей ветра выявляются более значимые различия между рядами данных. Если при сопоставлении среднемесячных значений было отмечено удовлетворительное согласование всех анализируемых рядов реанализа, то при оценке среднегодовых скоростей ветра достоверность связи (при уровне значимости $p = 0,05$) была подтверждена только для рядов ERA5 (см. табл. 2). Но в то же время для этих рядов выявлены заниженные среднегодовые значения скоростей ветра по сравнению с данными ст. Молодежная, так же как и для рядов NCEP/NCAR 1 и 20CRv2 (рис. 2). Наиболее близкие средние многолетние значения скоростей ветра получены по данным NCEP-DOE 2, которые оценены за период 1979–2021 гг. в $10,8 \pm 0,09$ м/с.

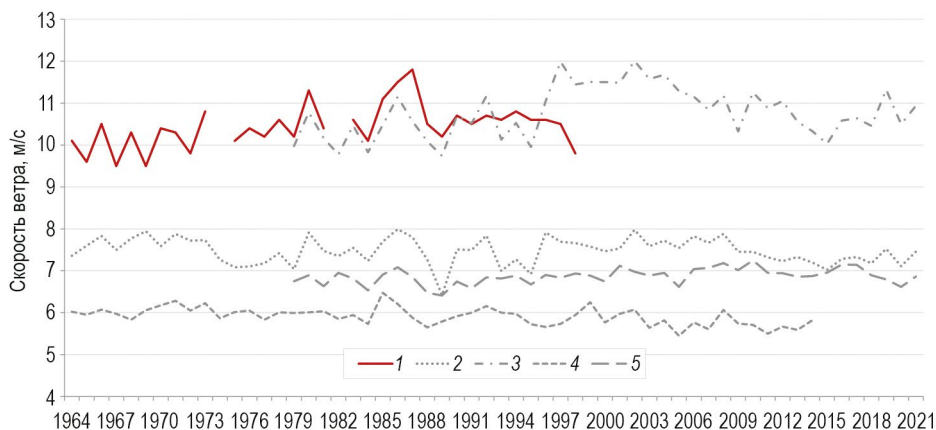


Рис. 2. Изменение среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м по данным инструментальных наблюдений на станции Молодежная и рядам реанализа для ближайших к станции узлов сетки: 1 — ст. Молодежная; 2 — NCEP/NCAR 1; 3 — NCEP-DOE 2; 4 — 20CRv2; 5 — ERA5

Fig. 2. Change in mean annual wind speed at a height of 10 m according to instrumental observations at the Molodezhnaya station and reanalysis series for grid nodes closest to the station: 1 — Molodezhnaya station; 2 — NCEP/NCAR 1; 3 — NCEP-DOE 2; 4 — 20CRv2; 5 — ERA5

Температура приземного воздуха

Данные наземных наблюдений на метеорологической станции Молодежная показывают, что в среднем за 35-летний период полных лет наблюдений с 1964 по 1998 г. среднегодовая температура на станции составляла $-10,98 \pm 0,13$ °C, варьируя от $-9,9$ до $-12,2$ °C (см. рис. 2). Отмечалась большая вариабельность среднемесячных минимумов по сравнению с максимумами (табл. 3). Разброс зимних температур (июнь–август) был в 8 раз больше, чем летних (декабрь–февраль) и в 2,3–2,4 раза больше, чем весенних и осенних.

Для всего периода инструментальных наблюдений в динамике среднегодовой температуры на ст. Молодежная наблюдалась статистически незначимая тенденция к потеплению (скорость изменений или линейный коэффициент b составил $0,017 \pm 0,055$ °C/10 лет), по среднемесячным максимумам выявлялся отрицательный тренд ($b = -0,19 \pm 0,07$ °C/10 лет). Среднемесячные минимумы характеризовались положительным, статистически незначимым трендом ($b = 0,10 \pm 0,15$ °C/10 лет).

В динамике среднемесячной температуры наибольший и статистически значимый рост отмечался для июля и июня ($b = 0,99$ и $0,39$ °C/10 лет), наибольшее понижение — для мая и декабря ($b = -0,53$ и $-0,29$ °C/10 лет).

Таблица 3

Результаты сравнительного анализа инструментальных наблюдений на ст. Молодежная за температурой и скоростью ветра в приемном слое атмосферы с рядами реанализа для ближайших к станции узлов сетки по периодам

Table 3

Results of the comparative analysis of the temperature and wind speed series of instrumental observations at the Molodezhnaya station and the reanalysis series for grid nodes closest to the station by periods

Ряд данных	Период, годы	Среднегодовое значение ± ст. ошибка	Коефф. линейного тренда, °С или м/с за 10 лет		Количество отклонений от ср. годовой нормы		Среднемесячные экстремумы	
			без сглаживания	с использованием метода многократного скользящего выравнивания, длина базы 15 лет	положительные	отрицательные	мин. знач. ± ст. ошибка	макс. знач. ± ст. ошибка
Приземная температура воздуха, °С								
Ст. Молодежная	1964–1983	-11,0 ± 0,11	-0,10	0,017 ± 0,055 (t = 0,31, df = 34)	11	9	-19,9 ± 0,36	-0,3 ± 0,17
	1979–1998	-11,0 ± 0,14	0,10		10	10	-20,0 ± 0,44	-0,6 ± 0,17
	1964–1983	-11,0 ± 0,14	0,02		11	9	-19,9 ± 0,37	-0,6 ± 0,17
	1979–1998	-10,9 ± 0,16	0,04		11	9	-19,9 ± 0,44	-0,7 ± 0,17
	1998–2017	-10,8 ± 0,13	0,01		11	9	-19,9±0,44	-2,1±0,28
GISS	1964–1983	-11,4 ± 0,10	-0,04	0,049 ± 0,044 (t = 1,11, df = 53)	11	9	-20,2 ± 0,38	-0,8 ± 0,17
	1979–1998	-11,4 ± 0,15	0,03		8	12	-20,3 ± 0,48	-0,9 ± 0,17
	1998–2017	-11,3 ± 0,13	0,43		8	12	-20,3 ± 0,37	-1,0 ± 0,18
	1979–1998	-13,6 ± 0,11	-0,12		11	9	-22,3 ± 0,41	-3,8 ± 0,16
	1998–2017	-13,9 ± 0,14	0,14		8	12	-22,4 ± 0,34	-4,5 ± 0,18
Скорость ветра в приемном слое атмосферы, м/с								
Ст. Молодежная	1964–1983*	10,4 ± 0,11	0,41	0,287 ± 0,073 (t = 3,95, df = 34)	5	13	4,9 ± 0,13	15,4 ± 0,26
	1979–1998	10,7 ± 0,12	-0,16		14	5	5,6 ± 0,17	15,9 ± 0,22
	1979–1998	6,8 ± 0,04	0,02		12	8	4,8 ± 0,10	8,6 ± 0,10
	1998–2017	7,0 ± 0,03	0,08		18	2	5,1 ± 0,10	8,6 ± 0,11
ERA5				0,105 ± 0,022 (t = 4,01, df = 38)				

* — на ст. Молодежная для нескольких месяцев 1974 и 1982 гг. данные по скоростям ветра не представлены, поэтому среднегодовая для них не рассчитывалась, а линейные тренды получены с использованием средней арифметической соседних лет; t — расчетное значение t -критерия Стьюдента; df — число степеней свободы; жирным шрифтом выделены статистически значимые оценки трендов при уровне значимости $\alpha = 0,01$

Таким образом, температурные характеристики приземного слоя воздуха в районе станции Молодежная за период метеонаблюдений (1964–1998) описывались слабо выраженной положительной динамикой среднегодовых значений, температурный тренд статистически не подтвержден, изменения в основном касались отдельных месяцев года, были разнонаправленными и тем самым компенсировали друг друга.

Для анализа периода большего временного охвата, в том числе последних десятилетий, были использованы данные реанализа: ряды UDEL_AirT, ERA5 и GISS, которые показали наилучшую согласованность с температурными рядами ст. Молодежная (см. рис. 1). При их совокупном рассмотрении отмечены сходные тенденции, которые прослеживались в одни и те же отрезки времени.

На протяжении двух первых десятилетий с начала работы научной станции (1964–1983) по всем массивам данных отмечалось незначительное понижение или рост среднегодовой температуры, скорость изменений варьировала от $-0,10$ до $0,02$ °C/10 лет, что свидетельствует о достаточной стабильности температурных условий рассматриваемого периода (см. табл. 3). В многолетней динамике температур большинства месяцев года отмечался небольшой отрицательный тренд, за исключением периода с июля по сентябрь. Примечательно, что характер этих изменений, оцененный по разным исходным данным, хорошо согласуется (рис. 3).

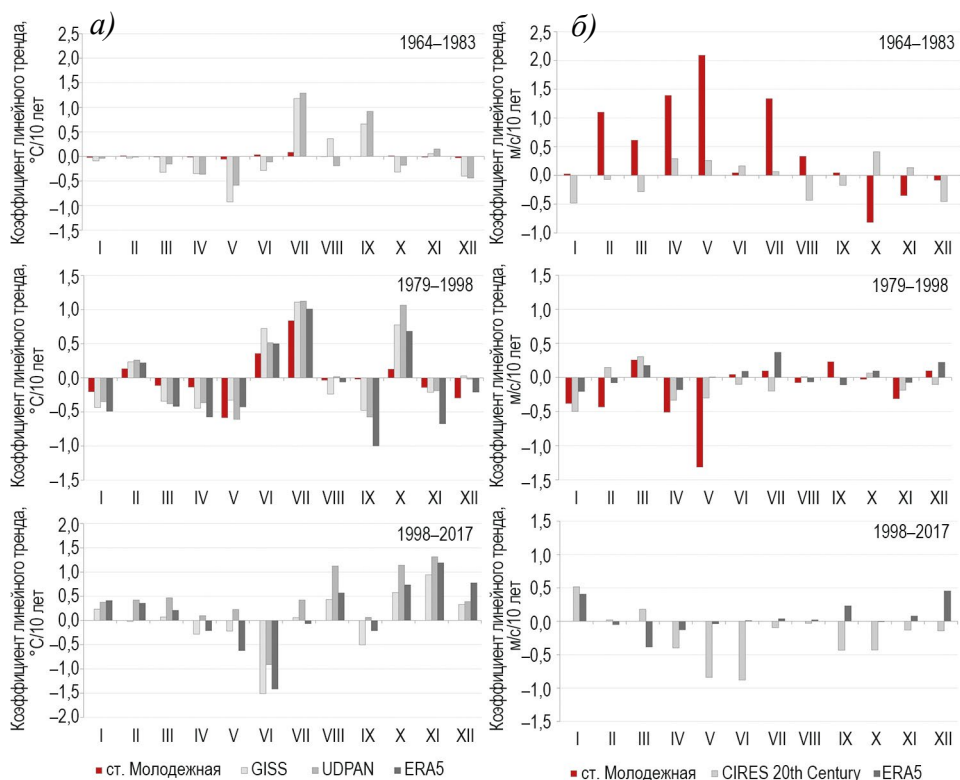


Рис. 3. Линейные коэффициенты трендов приземной температуры воздуха (а) и скорости ветра (б) по месяцам в соответствии с данными различных рядов для многолетних периодов
Fig. 3. Linear coefficients of trends in surface air temperatures (a) and wind speeds (b) by months in accordance with the data of various series for long-term periods

Для следующего отрезка времени (1979–1998 гг.) были отмечены в целом близкие по направленности тенденции в изменении средней температуры различных месяцев года: положительные преобладали в теплый период, отрицательные — в холодный. Наиболее значительное повышение температуры наблюдалось в июле, при этом характерный для предыдущего периода сентябрьский рост сдвинулся на октябрь, к нему добавилась положительная динамика в июле и феврале (см. рис. 3). Соответственно, для среднегодовой температуры этого периода с большей вероятностью выявлялись положительные тенденции (кроме рядов ERA5), оцененные по разным данным скоростью изменений от $-0,12$ до $0,1$ °C/10 лет. Вместе с тем среднегодовые нормы температур первых двух из выделенных периодов практически идентичны, различия в одну десятую градуса обнаруживаются только по ряду GISS. Также по всем массивам данных зафиксирован рост разброса среднегодовых значений (выросла ошибка среднего), который, вероятно, и обусловил появление малозначительных трендов.

Таким образом, выводы, сделанные по данным ст. Молодежная за весь период непрерывных измерений (1964–1998), в основном подтверждаются данными реанализа и свидетельствуют о незначительности изменений среднегодовых температурных характеристик, более существенные сдвиги были отмечены во внутригодовом распределении среднемесячных температур.

Период 1998–2017 гг. характеризуется положительными трендами среднегодовой температуры по разным рядам данных со скоростями прироста температур от $0,01$ до $0,43$ °C/10 лет. При этом изменения в средних значениях согласно рядам данных GISS и UDEL_AirT составляют $+0,1$ °C, а по рядам ERA5 — $-0,3$ °C (см. табл. 3). С учетом значений стандартной ошибки среднего, статистически значимые различия между среднегодовыми температурами второго и третьего выделенных периодов имеются только по ряду ERA5.

В многолетней динамике температур отдельных месяцев отмечены более выраженные изменения: в относительно теплую часть года тенденция к понижению температуры сменилась тенденцией к росту, а в холодную начало наблюдаться замедление скорости потепления или даже наметилась тенденция к похолоданию (согласно рядам GISS и ERA5). Наибольший рост температуры отмечен для ноября, октября и августа, а понижение — для июня. В целом тенденция к потеплению начала преобладать на протяжении большей части года: для 7 месяцев она выявлялась по всем анализируемым рядам, еще для 4 месяцев в зависимости от типа данных она была оценена как разнонаправленная. Понижение температуры, которое подтверждается всеми рядами данных, выявлено только для 1 месяца (см. рис. 3).

Оценки трендов, полученные по всей длине временного ряда методом многократного скользящего выравнивания, также показали преимущественно положительный, но статистически не значимый рост среднегодовой температуры, за исключением данных ERA5 (см. табл. 3).

Таким образом, интенсивность и направленность многолетних изменений среднемесячных температур в районе оазисов Молодежный и Вечерний в разные периоды менялась. За счет разнонаправленной динамики происходила взаимная компенсация, в результате чего среднегодовая температура оставалась близка к норме, различия между разными периодами времени были статистически не значимы. В то же время анализ динамики среднемесячных температур показывает, что происходит поступательное увеличение количества периодов в году, имеющих тенденцию к потеплению. В связи с этим о незначительном росте температуры в последние два десятилетия можно говорить с большей вероятностью, чем для периода первых десятилетий от начала инструментальных наблюдений на станции Молодежная.

Оценить масштаб и распространность выявленных тенденций можно на основе пространственно-распределенного анализа трендов температуры в районе исследования, который позволяют выполнить данные реанализа, распределенные по сетке. Для решения этой задачи были использованы температурные ряды ERA5 и UDEL_AirT. При сравнении с инструментальным рядом наблюдений первые давали заниженную оценку скоростей изменения, а вторые — завышенную. Анализ выполнялся для территории охватом 44–50° з. д. и 65,5–70° ю. ш., расположенной в западной части Земли Эндерби (рис. 4).

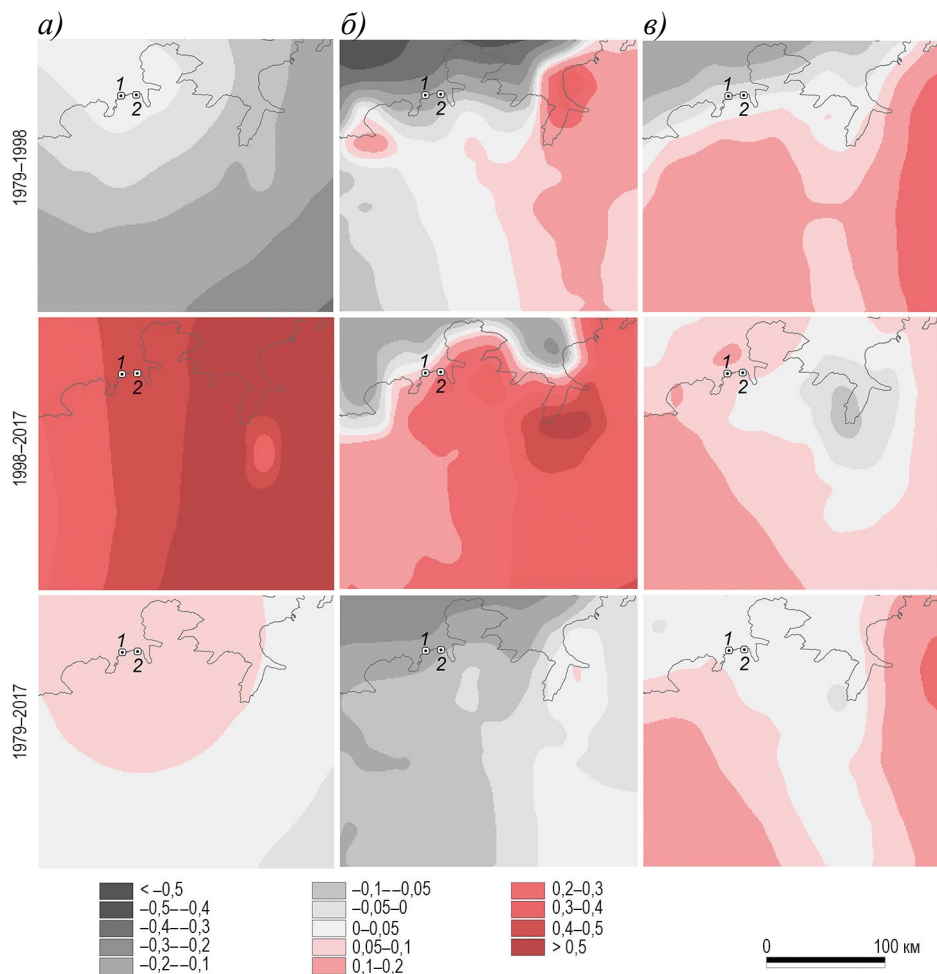


Рис. 4. Интенсивность изменения среднегодовой температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) и скорости ветра ($\text{м}/\text{с}/10$ лет) по данным реанализа для многолетних периодов: а) тренды температуры по данным UDEL_AirT, б) тренды температуры по данным ERA5, в) тренды скорости ветра по данным ERA5. Цифрами на карте обозначено: 1 — станция Молодежная, 2 — район базирования Белорусской антарктической экспедиции

Fig. 4. Intensity of change in average annual air temperatures ($^{\circ}\text{C}/10$ yr) and wind speeds ($\text{m}/\text{s}/10$ yr) according to reanalysis data for long-term periods: а) temperature trends according to UDEL_AirT data, б) temperature trends according to ERA5 data, в) wind speed trends according to ERA5 data

Поля, полученные по разным данным, отличаются характером расположения изолиний, тем не менее выявляется общая направленность изменений, отличающая различные временные отрезки. В период до 1998 г. на значительной части исследуемой территории скорости изменения температуры были незначительными. По данным UDEL_AirT над сушей преобладала тенденция к похолоданию, а по данным ERA5 — к незначительному потеплению. Значения линейных коэффициентов трендов на большей части исследуемой территории варьировали от $-0,3$ до $+0,15$ °C/10 лет. Более интенсивное потепление отмечено только для небольшого участка вблизи впадения в океан ледника Райнера (Rayner Glacier) — по данным ERA5.

Оценки для последующих двух десятилетий показывают более интенсивный рост среднегодовой температуры, до $+0,55$ °C за 10 лет, а по данным UDEL_AirT еще выше. Рост температуры наблюдался повсеместно на исследуемой территории, только ряды ERA5 на небольшом участке в прибрежной части показывают противоположную тенденцию.

Однако в целом для более продолжительного промежутка времени, с 1979 по 2017 г., среднегодовая температура значительных изменений не претерпела: незначительное похолодание 80–90-х компенсировалось потеплением последних двух десятилетий. Скорость изменения среднегодовой температуры в разных точках над сушей составляла от $-0,1$ до $0,2$ °C/10 лет. Потепление 1998–2017 гг. в наибольшей степени коснулось юго-восточной части исследуемой территории.

Скорости и направления ветра

По данным стационарных наблюдений на станции Молодежная (<http://www.aagi.aq/>), а также на АМС, установленных в недавнее время, выявлено, что скорость ветра на Земле Эндерби и прилегающей территории варьирует в широких пределах: от штилевых условий до штормовых и ураганных ветров. В районе г. Вечерняя максимальный зарегистрированный порыв ветра достиг 56 м/с (февраль 2018 г.), на станции Молодежная — до 70 м/с и более. Среднегодовая норма скорости ветра составила $10,4 \pm 0,09$ м/с.

Анализ среднегодовых значений скорости ветра, наблюдавшихся на станции Молодежная в период 1963–1999 гг., выявил положительную и статистически значимую динамику, которая сильнее всего наблюдалась до 1984 г. (см. табл. 3).

Самым маловетренным месяцем на станции Молодежная был январь 1974 г. со средней скоростью ветра 3,2 м/с, а наиболее ветреным — апрель 1986 г. со средней скоростью 17,6 м/с. Наибольшие скорости ветра чаще наблюдались в осенний (март–май) и зимний (июнь–июль) периоды.

В динамике розы ветров выявлено возрастание повторяемости ЮВ ветров, обычно доминирующих с марта по июнь, и уменьшение южных (рис. 5). Если до 1987 г. доля ЮВ ветров составляла преимущественно менее 30 % (в такие годы возрастала частота южных ветров), то с конца 1980-х она возросла до 40 % и более (исключение 1997 г.).

Анализ данных ERA5 для ближайшего к ст. Молодежной узла сетки показал, что имеется статистически подтвержденный положительный тренд среднегодовых скоростей ветра, который наиболее выражен в последние десятилетия. В период 1979–1998 гг. прирост происходил существенно более низкими темпами. О возрастании среднегодовых скоростей ветра говорит также и увеличение со временем числа положительных отклонений от нормы (см. табл. 3).

Пространственный анализ трендов по данным ERA5 показал, что рост скоростей ветра наблюдается над большей частью Земли Эндерби (см. рис. 4). Значения линейного коэффициента тренда на рассматриваемой территории варьируют

от $-0,050$ до $0,3$ м/с/10 лет. Ближе к центральной меридиональной полосе (вдоль долготы $46-48^\circ$) они близки к нулю и возрастают к краевым частям, по направлению к Земле Королевы Мод на западе и к Земле Кемпа на востоке.

Различия в динамике скоростей по месяцам года сложно оценить из-за неудовлетворительного согласования разных рядов данных (см. рис. 3). Более чем для половины месяцев в году обнаруживается разнонаправленная динамика по рядам реанализа и рядам инструментальных наблюдений. Это обстоятельство не позволяет сделать однозначный вывод о преобладании определенной тенденции в тот или иной период года.

В динамике розы ветров по данным ERA5 не было выявлено значимых изменений за весь исследуемый период (рис. 5). Отмечается, что распределения полей ветра исходя из рядов реанализа, оцененные по 24-кратным суточным данным,

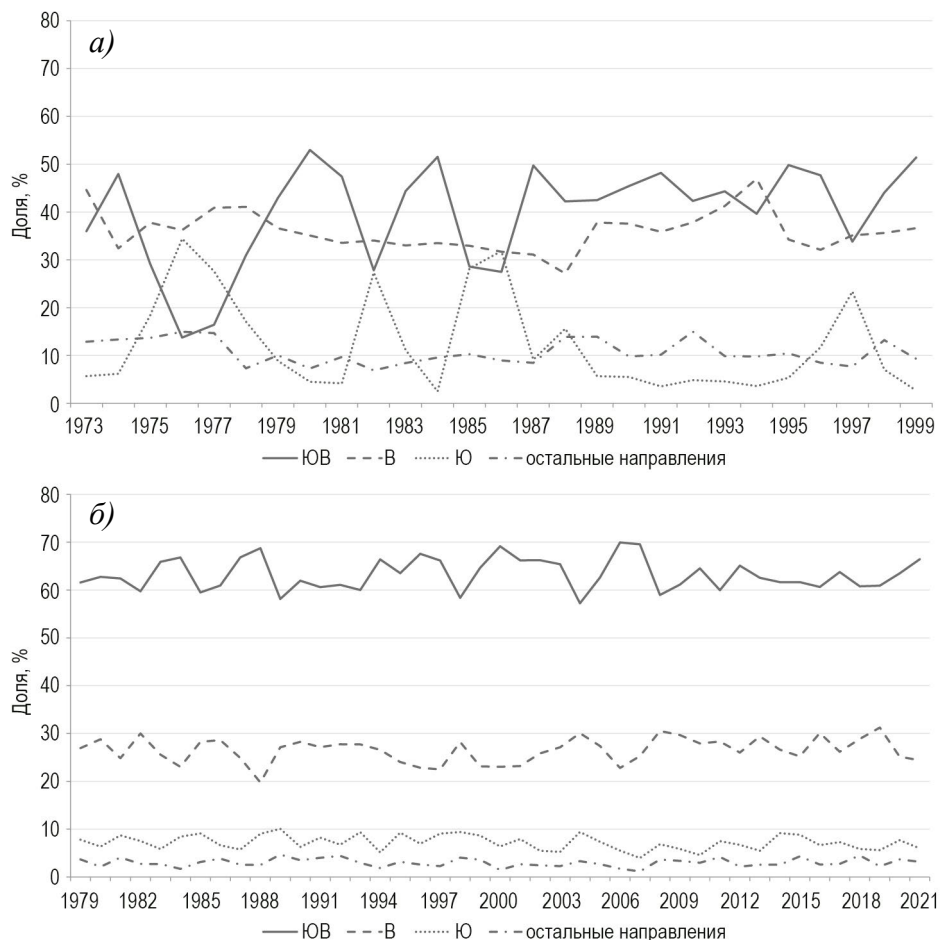


Рис. 5. Изменения в распределении полей ветра по направлениям: а) по данным наблюдений на станции Молодежная за период 1973–1998 гг., % (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa>); б) по данным рядов реанализа ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>)

Fig. 5. Changes in the distribution of wind fields by directions: а) according to observations at the Molodezhnaya station for the period 1973–1998, % (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa>), б) according to ERA5 reanalysis data (<https://cds.climate.copernicus.eu/>)

являются значительно менее вариабельными по сравнению с данными наземных наблюдений. Также по данным ERA5 выявляется более высокая доля ветров ЮВ и Ю направлений и меньшая — восточных.

В целом по результатам анализа различных данных по характеристикам ветра на Земле Эндерби с достаточно высокой вероятностью можно говорить только о росте среднегодовых скоростей ветра, которая в среднем оценивается в 0,1–0,3 м/с/10 лет.

Сравнение с литературными данными

Наиболее детальные данные по динамике климатических показателей в районе Земли Эндерби содержатся в работе [1], которая выполнена на основе анализа многолетних данных наземных наблюдений до 2000 г. Для среднегодовой температуры на станции Молодежная описан незначительный отрицательный тренд, который убывает с течением времени: $-0,11 \pm 0,43$ в 1961–1990 и $-0,04 \pm 0,45$ в 1971–2000 гг. Оценки получены для периодов, отличающихся от принятых в настоящей работе. Тем не менее хорошо совпадают значения трендов, полученных для первых десятилетий, а также общая тенденция к замедлению темпов похолодания (см. табл. 3).

В исследовании [18] тренд-анализ температуры приземного воздуха выполнен для 20- (1979–1998) и 45-летних (1954–1998) периодов, показаны изменения среднегодовой температуры приземного воздуха для соседних со станцией Молодежная станций Сёва и Моусон, которые для периода 1979–1998 гг. оцениваются соответственно в $-0,46$ и $+0,15$ °C/10 лет. Анализ динамики температуры по спутниковым данным за этот же период для разных районов Антарктики показал тренды от $-0,42 \pm 0,67$ °C/10 лет. Для района Земли Эндерби, согласно приложенной карте, эти значения варьируют преимущественно от $-0,5$ до $+0,5$ °C/10 лет. В таких же пределах находятся полученные нами оценки для этого района по данным реанализа UDEL_AirT и ERA5 (см. рис. 4).

По скоростям ветра в исследовании [1] для станции Молодежная данные не представлены, а для соседних станций Сёва и Моусон тренды среднегодовых скоростей оценены соответственно в $+0,085 \pm 0,231$ узлов/10 лет ($0,044 \pm 0,119$ м/с/10 лет) и $+0,046 \pm 0,519$ узлов/10 лет ($0,024 \pm 0,267$ м/с/10 лет), что близко к значениям, полученным нами для соответствующих районов по данным ERA5 (см. рис. 4). Согласно оценкам [16] на станции Молодежная выявляется рост средних скоростей ветра зимнего периода ($+0,23$ м/с/10 лет для 1963–1998 и $0,02$ м/с/10 лет для периода 1979–2006 гг.), а также увеличение повторяемости сильных ветров, $>17,2$ м/с ($+4,2$ случая/10 лет для 1963–1998 и $+0,8$ случаев/10 лет для периода 1979–2006 гг.). В исследовании [19], по данным реанализа ERA-Interim, динамика скоростей ветра в целом для Восточной Антарктики оценивается как положительная, особенно для летнего и весеннего периодов. Эти данные хорошо соотносятся с результатами, полученными в настоящем исследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненного анализа выявлено, что наилучшие результаты при сопоставлении с данными инструментальных наблюдений дают температурные ряды реанализа. Из них хорошую сходимость, как по средним значениям, так и по динамике, имеют ряды UDEL_AirT, ERA5 и GISS. Характеристики ветра надежнее описываются рядами ERA-Interim и NCEP-DOE Reanalysis 2. При этом с первыми обнаруживается более высокая теснота связи (корреляция) при существенно заниженных средних значениях, а со вторыми — большая сходимость средних значений при плохой согласованности динамики.

Тренд-анализ среднемесячных и среднегодовых значений большинства температурных рядов для района Земли Эндерби показал наличие статистически не

значимой тенденцию к потеплению. Интенсивность и направленность изменений в разные отрезки времени для разных периодов года менялась, из-за этого общий тренд изменений был незначительным. В то же время анализ среднемесячных температур показывает, что происходит поступательное увеличение количества периодов в году, имеющих тенденцию к потеплению. Если в 1964–1983 гг. рост температуры был выявлен только для июля и сентября, в последующие годы оно отмечалось в феврале, июне, июле и октябре, а для 1998–2017 гг. — для большей части месяцев года (7). Это позволяет сделать вывод об ускорении положительной динамики в росте температуры в последние два десятилетия, хотя она не достигла значимых величин.

По анализу характеристик ветра для района Земли Эндерби, в связи с несогласованностью разных рядов данных, достаточно уверенно можно говорить только о статистически значимом росте среднегодовых скоростей ветра примерно на 0,1–0,3 м/с/10 лет.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственных программ «Мониторинг полярных районов Земли, создание Белорусской антарктической станции и обеспечение деятельности полярных экспедиций на 2016–2020 годы» и «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» на 2021–2025 гг.

Competing interests. There is no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of the State programs “Monitoring of the polar regions of the Earth, development of the Belarusian Antarctic station and supporting the activities of polar expeditions for 2016–2020” and “Development of the activities of the Belarusian Antarctic station” for 2021–2025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Turner J., Colwell S. R., Marshall G. J., Lachlan-Cope T. A., Carleton A. M., Jones P. D., Lagun V., Reid P. A., Iagovkina S. Antarctic climate change during the last 50 years // *International journal of Climatology*. 2005. V. 25. № 3. P. 279–294.
2. Turner J., Bindshadler R. A., Convey P., Di Prisco G., Fahrback E., Gutt J., Hodgson D. A., Mayewski P. A., Summerhayes C. P. Antarctic Climate Change and the Environment. Cambridge: SCAR, 2009. 526 p.
3. Turner J., Barrand N. E., Bracegirdle T. J., Convey P., Hodgson D. A., Jarvis M., ... & Klepikov A. Antarctic climate change and the environment: an update // *Polar Record*. 2014. V. 50. № 3. P. 237–259. doi: 10.1017/S0032247413000296.
4. Gillett N. P., Stone D. A., Stott P. A., Nozawa T., Karpechko A. Y., Hegerl G. C., Wehner M. F., Jones P. D. Attribution of polar warming to human influence // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. № 11. P. 750–754.
5. Convey P. Antarctic climate change and its influences on terrestrial ecosystems // Bergstrom D., Convey P., Huiskes A. H. L. (eds.). *Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems: Antarctica as a global indicator*. Dordrecht: Springer, 2006. P. 253–272.
6. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2019. <https://www.ipcc.ch/srocc/home/>.
7. Convey P., Bindshadler R., Di Prisco G., Fahrback E., Gutt J., Hodgson D. A., Mayewski P. A., Summerhayes C. P., Turner J. Antarctic climate change and the environment // *Antarctic Science*. 2009. V. 21. № 6. P. 541–563.

8. Marshall G.J., Orr A., Turner J. A predominant reversal in the relationship between the SAM and East Antarctic temperatures during the twenty-first century // *Journal of Climate*. 2013. V. 26. № 14. P. 5196–5204.
9. Bromwich D.H., Nicolas J.P., Monaghan A.J., Lazzara M.A., Keller L.M., Weidner G.A., Wilson A.B. Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth // *Nature Geoscience*. 2013. V. 6. P. 139–145. doi: 10.1038/ngeo1671.
10. 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. P. 459–462.
11. Bracegirdle T.J., Connolley W.M., Turner J. Antarctic climate change over the twenty first century // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008. V. 113. D03103. doi: 10.1029/2007JD008933.
12. Robinson S.A., King D.H., Bramley-Alves J., Waterman M.J., Ashcroft M.B., Wasley J., Turnbull J.D., Miller R.E., Ryan-Colton E., Benny T., Mullany K., Clarke L. J., Barry L., Hua Q. Rapid change in East Antarctic terrestrial vegetation in response to regional drying // *Nature Climate Change*. 2018. V. 8. № 10. P. 879–884.
13. Harig C., Simons F.J. Accelerated West Antarctic ice mass loss continues to outpace East Antarctic gains // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 415. P. 134–141.
14. Zwally H.J., Giovinetto M.B. Overview and assessment of Antarctic ice-sheet mass balance estimates: 1992–2009 // *Surveys in Geophysics*. 2011. V. 32. № 4. P. 351–376.
15. Эндерби Земля // *Словарь современных географических названий* / Под общ. ред. акад. В. М. Котлякова. Институт географии РАН. Екатеринбург: У-Фактория, 2006.
16. Turner J., Chenoli S.N., Abu Samah A., Marshall G., Phillips T., Orr A. Strong wind events in the Antarctic // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. V. 114. D18103. doi: 10.1029/2008JD011642.
17. Merzlyakov E.G., Murphy D.J., Vincent R.A., Portnyagin Y.I. Long-term tendencies in the MLT prevailing winds and tides over Antarctica as observed by radars at Molodezhnaya, Mawson and Davis // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2009. V. 71. № 1. P. 21–32.
18. Comiso J.C. Variability and trends in Antarctic surface temperatures from in situ and satellite infrared measurements // *Journal of Climate*. 2000. V. 13. № 10. P. 1674–1696.
19. Yu L., Zhong S., Sun B. The climatology and trend of surface wind speed over Antarctica and the Southern Ocean and the implication to wind energy application // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 1. P. 108. doi: 10.3390/atmos11010108.
20. Афанасьев В.Н., Юзбаев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 2012. 320 с.

REFERENCES

1. Turner J., Colwell S. R., Marshall G. J., Lachlan-Cope T. A., Carleton A. M., Jones P. D., Lagun V., Reid P.A., Iagovkina S. Antarctic climate change during the last 50 year. *International journal of Climatology*. 2005, 25 (3): 279–294.
2. Turner J., Bindshadler R.A., Convey P., Di Prisco G., Fahrbach E., Gutt J., Hodgson D.A., Mayewski P.A., Summerhayes. C.P. *Antarctic Climate Change and the Environment*. Cambridge: SCAR, 2009: 526 p.
3. Turner J., Barrand N. E., Bracegirdle T. J., Convey P., Hodgson D. A., Jarvis M., ... & Klepikov A. Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Record*. 2014, 50 (3): 237–259. doi: 10.1017/S0032247413000296.
4. Gillett N.P., Stone D.A., Stott P.A., Nozawa T., Karpechko A.Y., Hegerl G.C., Wehner M.F., Jones P.D. Attribution of polar warming to human influence. *Nature Geoscience*. 2008, 1 (11): 750–754.

5. Convey P. Antarctic climate change and its influences on terrestrial ecosystems. Bergstrom D., Convey P., Huiskes A.H.L. (eds.). Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems: Antarctica as a global indicator. Dordrecht: Springer, 2006: 253–272.
6. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2019. <https://www.ipcc.ch/srocc/home/>
7. Convey P., Bindshadler R., Di Prisco G., Fahrbach E., Gutt J., Hodgson D.A., Mayewski P.A., Summerhayes C.P., Turner J. Antarctic climate change and the environment. Antarctic Science. 2009, 21 (6): 541–563.
8. Marshall G.J., Orr A., Turner J. A predominant reversal in the relationship between the SAM and East Antarctic temperatures during the twenty-first century. Journal of Climate. 2013, 26 (14): 5196–5204.
9. Bromwich D.H., Nicolas J.P., Monaghan A.J., Lazzara M.A., Keller L.M., Weidner G.A., Wilson A.B. Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth. Nature Geoscience. 2013, 6: 139–145. doi: 10.1038/ngeo1671.
10. 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, 457 (7228): 459–462.
11. Bracegirdle T.J., Connolley W.M., Turner J. Antarctic climate change over the twenty first century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008, 113: D03103. doi: 10.1029/2007JD008933.
12. Robinson S.A., King D.H., Bramley-Alves J., Waterman M.J., Ashcroft M.B., Wasley J., Turnbull J.D., Miller R.E., Ryan-Colton E., Benny T., Mullany K., Clarke L. J., Barry L., Hua Q. Rapid change in East Antarctic terrestrial vegetation in response to regional drying. Nature Climate Change. 2018, 8 (10): 879–884.
13. Harig C., Simons F.J. Accelerated West Antarctic ice mass loss continues to outpace East Antarctic gains. Earth and Planetary Science Letters. 2015, 415: 134–141.
14. Zwally H.J., Giovinetto M.B. Overview and assessment of Antarctic ice-sheet mass balance estimates: 1992–2009. Surveys in Geophysics. 2011, 32 (4): 351–376.
15. Enderby Land. Dictionary of modern geographical names. Ed. V. M. Kotlyakov. Institute of Geography RAS. Yekaterinburg: U-Factoria, 2006. [In Russian].
16. Turner J., Chenoli S.N., Abu Samah A., Marshall G., Phillips T., Orr A. Strong wind events in the Antarctic. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2009, 114: D18103. doi: 10.1029/2008JD011642.
17. Merzlyakov E.G., Murphy D.J., Vincent R.A., Portnyagin Y.I. Long-term tendencies in the MLT prevailing winds and tides over Antarctica as observed by radars at Molodezhnaya, Mawson and Davis. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009, 71 (1): 21–32.
18. Comiso J.C. Variability and trends in Antarctic surface temperatures from in situ and satellite infrared measurements. Journal of Climate. 2000, 13 (10): 1674–1696.
19. Yu L., Zhong S., Sun B. The climatology and trend of surface wind speed over Antarctica and the Southern Ocean and the implication to wind energy application. Atmosphere. 2020, 11 (1): 108. <https://doi.org/10.3390/atmos11010108>.
20. Afanas'ev V.N., Yuzbashev M.M. Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye. 2-e izd., pererab. i dop. Time series analysis and forecasting. Moscow: Finansy i statistika, 2012: 320 p. [In Russian].