

# МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-464-485>  
УДК 551.582



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL PAPER

## Изменения параметров экстремальных температурных событий западной части Российской Арктики по данным реанализов ERA5 и MERRA-2 в 1980–2022 гг.

И.В. Серых<sup>1✉</sup>, А.Г. Костяной<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Геофизический центр РАН, Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва, Россия*

✉ [iserykh@ocean.ru](mailto:iserykh@ocean.ru)

ИД ИВС, 0000-0002-2435-7886; АГК, 0000-0001-7441-5055

**Аннотация.** Исследованы среднесуточные аномалии температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности (ТВП) в регионе западной части Российской Арктики (60–75° с. ш., 30–85° в. д.) по данным реанализов ERA5 и MERRA-2 за период 1980–2022 гг. Рассчитаны их среднеквадратические отклонения и распределение их среднего количества за год. Показано, что экстремальные события с положительными аномалиями ТВП усиливаются, удлиняются и учащаются над частью акваторий Баренцева, Карского и Белого морей, а также над некоторыми участками суши исследуемого региона. При этом амплитуда, продолжительность и число экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП в этих районах сокращаются.

**Ключевые слова:** аномалии температуры, Баренцево море, Белое море, Карское море, потепление климата, северо-запад России, температура воздуха, экстремальные события

**Для цитирования:** Серых И.В., Костяной А.Г. Изменения параметров экстремальных температурных событий западной части Российской Арктики по данным реанализов ERA5 и MERRA-2 в 1980–2022 гг. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023; 69(4): 464–485. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-464-485>

Поступила 29.04.2023

После переработки 31.08.2023

Принята 04.12.2023

## **Changes in the parameters of extreme temperature events in the western part of the Russian Arctic according to ERA5 and MERRA-2 reanalyses in 1980–2022**

Ilya V. Serykh<sup>1</sup>✉, Andrey G. Kostianoy<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *S. Yu. Witte Moscow University, Moscow, Russia*

✉ [iserykh@ocean.ru](mailto:iserykh@ocean.ru)

ID IVS, 0000-0002-2435-7886; AGK, 0000-0001-7441-5055

**Abstract.** The air temperature in the Arctic zone of Russia is increasing at a rate of 0.71 °C per decade, which is three times faster than the global average. The warming of climate is accompanied by an increase in its extremeness, which leads to an increase in the number of dangerous hydrometeorological phenomena. The most significant changes occurred in the statistics of large-scale summer heat waves in European Russia. One of the most important goals in studying current climate changes is to study the frequency of extreme hydrometeorological phenomena, in particular, heat or cold waves. In this paper, we investigate the average daily anomalies relative to the annual variation of air temperature at a height of 2 meters from the surface in the region of the western part of the Russian Arctic (60°–75° N, 30°–85° E), according to ERA5 and MERRA-2 atmospheric reanalyses for the period 1980–2022. Their root-mean-square deviations and the distribution of their average number per year are calculated. We have plotted the fields of average values and the rate of changes in the amplitude, duration and number of anomalous temperature events which exceed two standard deviations in the study region. Areas of increase and decrease in the amplitude, duration and number of extreme events, both with positive and negative temperature anomalies, are displayed. In general, it can be concluded that, on average, the amplitudes of positive extreme air temperature anomalies in the study area slightly increase. The duration of positive extreme anomalies is growing everywhere at a rate of 0.2 days per 10 years. The duration of negative extreme anomalies slightly decreases. The number of events with negative extreme anomalies has been decreasing at a rate of –0.5 to –3 events per year for 10 years, while the number of events with positive extreme anomalies has been increasing from 0.1 to 1 events per year for 10 years. The results obtained significantly expand our knowledge of the spatiotemporal features of the ongoing changes in the extreme climate of the western part of the Russian Arctic, which is of paramount importance for the analysis and forecasting of the development of natural and socio-economic systems in the region under study.

**Keywords:** air temperature, Barents Sea, climate warming, extreme events, Kara Sea, Northwest Russia, temperature anomalies, White Sea

**For citation:** Serykh I.V., Kostianoy A.G. Changes in the parameters of extreme temperature events in the western part of the Russian Arctic according to ERA5 and MERRA-2 reanalyses in 1980–2022. *Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69 (4): 464–485. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-464-485>

Received 29.04.2023

Revised 31.08.2023

Accepted 04.12.2023

### **Введение**

В октябре 2022 г. Росгидромет опубликовал Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [1]. В нем говорится, что температура воздуха над территорией России растет почти вдвое быстрее, чем над планетой в целом: 0,51 °C за десятилетие, причем каждое десятилетие с 1981–1990 гг. теплее предыдущего, а из 10 самых теплых лет 9 наблюдались в XXI в. Температура воздуха в Арктической зоне России (АЗРФ) по данным гидрометеорологических станций растет еще быстрее — 0,71 °C за десяти-

летие [1]. Потепление климата сопровождается усилением его экстремальности, что приводит к увеличению числа опасных гидрометеорологических явлений. Наиболее значительные изменения произошли в статистике крупномасштабных летних волн тепла на европейской территории России [1]. Например, если в период 1961–1980 гг. таких волн тепла продолжительностью от 5 дней со средней температурой в регионе выше 90-го перцентиля наблюдалось всего три, то в период 2001–2020 гг. лишь одно лето 2004 г. прошло без них. Как следствие, наметилась тенденция к расширению зон лесных пожаров, которые в последнее время стали охватывать значительные районы Арктики, где они ранее не наблюдались.

Аналогичные волны тепла наблюдаются и в арктических морях [2]. Так, J. Overland [3] на основе данных о температуре поверхности океана (ТПО) по ежедневным данным наблюдений и спутниковым данным (реанализ NOAA DOISST v2.1) показал, что интенсивность, продолжительность, частота и площадь арктических морских волн тепла увеличились в 1982–2020 гг. из-за потепления климата. Максимальные экстремальные значения аномалий ТПО составляют от 3 °C до 5 °C в Баренцевом море, Карском море, море Лаптевых, Восточно-Сибирском море, Чукотском море, море Бофорта и заливе Баффина и от 3 °C до 4 °C в Норвежском и Гренландском морях. Эти события обычно начинались с середины июля — начала августа и продолжались до середины августа в 1982–2000 гг., до начала сентября в 2000–2010 гг. и до конца сентября в 2010–2020 гг.

Согласно Шестому оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [4] и Третьему оценочному докладу об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [1] изменение климата будет сопровождаться увеличением частоты экстремальных гидрометеорологических явлений. И это действительно происходит, однако весьма неравномерно и неоднозначно по различным районам Земли [4]. Поэтому мы в своих работах исследовали межгодовую изменчивость не только частоты, но и амплитуды и продолжительности экстремальных температурных явлений, при этом наблюдаемые аномалии температуры воздуха рассматривали отдельно — положительные и отрицательные, а также разбивали их на аномальные и экстремальные. Аномальными явлениями мы условно считали аномалии, которые непрерывно на протяжении одних или более суток превосходили одно среднееквдратичное отклонение в распределении аномалий температуры воздуха, а экстремальными — два среднееквдратичных отклонения.

Эта методика уже успешно применялась нами для Черного моря [5], Адриатического побережья Черногории [6], Баренцева моря [7] и Эгейского моря [8]. Эти исследования показали, что межгодовая изменчивость амплитуды, частоты и продолжительности положительных и отрицательных аномалий температуры воздуха весьма различается от района к району.

В работах А.В. Кислова с соавторами детально проанализированы экстремумы скорости ветра в Европейском секторе Арктики [9, 10], описаны экстремальные гидрометеорологические явления Баренцева и Карского морей (модуль скорости ветра, суточные суммы осадков и высота волн) с точки зрения различных функций распределения вероятностей, а также дано общее описание изменчивости опасных погодных явлений в Арктике в связи с региональным изменением климата.

С.А. Дунцев и В.С. Платонов [11] оценили качество воспроизведения приземной температуры воздуха новым модельным архивом COSMO-CLM Russian Arctic

hindcast высокого разрешения по данным 65 европейских и 81 российских арктических метеостанций за 1980–2016 гг. и показали, что среднеквадратическая ошибка составляет 1,82 °C для среднемесячных значений температуры воздуха. Наибольшие различия между данными наблюдаются на метеостанциях со сложным рельефом окружающей местности и из-за разности высоты расположения метеостанции и узла модельной сетки, что может давать ошибку до 2–3 °C.

И.В. Железнова и Д.Ю. Гущина [12] на основе данных реанализа ERA-5 за 1980–2021 гг. оценили глобальное распределение частоты встречаемости экстремальной температуры воздуха и атмосферных осадков на основе среднемесячных данных. Анализ был сделан на основе двух критериев — одного среднеквадратического отклонения и 5%- и 95%-квантилей, причем коэффициент пространственной корреляции между двумя критериями составил для температуры воздуха 0,85–0,86. Авторы также отметили, что реанализ ERA-5 хорошо описывает пространственную структуру климатических полей.

Д.Б. Киктев и др. [13] на основе данных реанализа NCEP/NCAR о приземной температуре воздуха и осадках с суточным разрешением провели автоматическую идентификацию объектов, ассоциированных с различными экстремальными метеорологическими явлениями на сезонных и внутрисезонных масштабах времени. В зависимости от пространственной протяженности, продолжительности и интенсивности проведена инвентаризация экстремальных явлений на временном интервале 1981–2019 гг. для Северного полушария, и показана связь изменений характеристик экстремальных явлений с изменениями климата.

И.В. Серых и А.В. Толстикова [14, 15] обнаружили увеличение температуры и влажности воздуха западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. и выдвинули гипотезу, что это привело к росту теплосодержания нижнего слоя атмосферы — увеличению его тепловой энергии. Вследствие чего можно ожидать увеличения количества, силы и продолжительности экстремальных погодных явлений в исследуемом регионе. Из-за быстрого роста средней температуры в Арктике в последние десятилетия следует ожидать роста аномально теплых и сокращения аномально холодных дней за этот период. При том, что увеличение температуры произошло достаточно равномерно по пространству западной части Российской Арктики [14], в некоторых локальных районах рост аномально теплых дней может опережать или отставать от среднего по более обширному региону. Обнаружение таких локальных очагов роста или, наоборот, сокращения экстремальных температурных событий вследствие местных географических особенностей и нелинейной динамики климата представляет особый интерес.

Целью данной работы является исследование пространственного распределения междекадных изменений среднесуточных аномалий температуры воздуха в регионе западной части Российской Арктики (60–75° с. ш., 30–85° в. д.) по данным атмосферных реанализов ERA5 и MERRA-2 за период 1980–2022 гг. Исследование включает междекадные изменения не только частоты, но и амплитуды и продолжительности экстремальных температурных событий (явлений), при этом наблюдаемые аномалии температуры рассматривались отдельно — положительные и отрицательные.

ERA5 — это реанализ пятого поколения глобального климата и погоды за последние 8 десятилетий Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF) [16]. ERA5 предоставляет ежечасные оценки для большого количества атмосферных величин, океанских волн

и параметров поверхности суши. ERA5 объединяет данные модели с наблюдениями со всего мира в глобально полный и согласованный набор данных с использованием законов физики. Этот принцип, называемый ассимиляцией данных, основан на методе, используемом центрами численного прогнозирования погоды, где каждые несколько часов (12 часов в ECMWF) предыдущий прогноз объединяется с новыми доступными наблюдениями оптимальным способом для получения новой наилучшей оценки состояния атмосферы. ERA5 работает таким же образом, но с уменьшенным разрешением, что позволяет получить набор данных за несколько десятилетий назад. ERA5 не имеет ограничений, связанных с выдачей своевременных прогнозов, поэтому остается больше времени для сбора наблюдений и можно использовать улучшенные версии исходных наблюдений, что повышает качество продукта реанализа. Выходные данные ERA5 представлены на регулярной сетке  $0,25^\circ$  ш.  $\times$   $0,25^\circ$  д.

Ретроспективный анализ (реанализ) современной эпохи для исследований и приложений версия 2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications Version 2 — MERRA-2) создан в Глобальном бюро моделирования и ассимиляции (Global Modeling and Assimilation Office) Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration — NASA). MERRA-2 представляет собой атмосферный реанализ современной эры спутниковых наблюдений, начинающейся с 1980 г. [17]. Он заменяет исходный реанализ MERRA [18] и использует обновленную версию системы усвоения данных Goddard Earth Observing System Model Version 5 (GEOS-5). MERRA-2 включает обновления модели GEOS [19] и схемы глобальной статистической интерполяции (Global Statistical Interpolation) [20]. Выходные данные MERRA-2 представлены на регулярной сетке  $0,5^\circ$  ш.  $\times$   $0,625^\circ$  д., но модель GEOS-5 вычисляет все поля на сетке кубических сфер с приблизительным разрешением  $50 \text{ км} \times 50 \text{ км}$ . Поэтому распределенные наборы данных пространственно интерполированы на сетку  $0,5^\circ$  ш.  $\times$   $0,625^\circ$  д.

Luo et al. [21] оценили точность воспроизведения температуры поверхности моря, вертикальных профилей температуры и влажности воздуха над Атлантическим океаном по данным атмосферных реанализов MERRA-2 и ERA-Interim с использованием судовых измерений радиозондами проекта AEROSE (Aerosols and Ocean Science Expeditions). В частности, было показано, что в слое ниже  $500 \text{ hPa}$  средняя разница в температуре воздуха не превышает двух градусов, таким образом, данные этих реанализов можно использовать для различных исследований [21]. ERA5 позиционируется ECMWF как замена ERA-Interim.

### **Данные и методика**

Для вычисления среднесуточных аномалий использовались данные температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности (ТВП) из реанализов ECMWF ERA5 [16] и NASA MERRA-2 [17] с временным шагом в один час за период 1980–2022 гг. Исходные ежечасные данные ТВП усреднялись за 24 часа для получения среднесуточных данных. В каждом узле сеток ERA5 и MERRA-2 для среднесуточных данных ТВП рассчитывался среднегодовой ход за рассматриваемый период 1980–2022 гг., который затем вычитался из соответствующих данных для получения среднесуточных аномалий относительно среднегодового хода (далее просто аномалий). По вычисленным аномалиям ТВП для региона западной части Российской Арктики ( $60\text{--}75^\circ$  с. ш.,  $30\text{--}85^\circ$  в. д.) рассчитано и построено поле их стандартных (среднеквадратических)

отклонений (рис. 1). Выбор именно этого региона обусловлен границами, определенными в работах [14, 15, 22], в которых исследованы междекадные изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. по данным MERRA-2.

Анализ производился на основе стандартных (среднеквадратических) отклонений. Отдельно рассматривались экстремальные события (явления) с положительными и отрицательными аномалиями ТВП. Из-за ограничений на объем статьи и рисунков в данной работе мы остановимся только на результатах, касающихся экстремальных событий. Методом наименьших квадратов для указанных выше экстремальных событий с положительными и отрицательными аномалиями ТВП вычислены поля скорости изменений (коэффициентов линейных трендов) их среднегодовой амплитуды, количества и продолжительности. Кроме того, по *t*-критерию Стьюдента оценена достоверность рассчитанных трендов, и на каждом поле с линейными трендами, в каждом узле сетки, поставлена точка в тех случаях, когда достоверность оказывалась менее 80 %.

### Результаты

Результаты, полученные по данным MERRA-2, во многом совпадают с аналогичными результатами, полученными по данным ERA5. Это свидетельствует о достоверности полученных результатов. И поскольку у данных ERA5 выше пространственное разрешение, то в работе приведены рисунки, полученные по ERA5.

Прежде всего были картированы средние за период 1980–2022 гг. значения ТВП и стандартные (среднеквадратические) отклонения их аномалий в исследуемом регионе (рис. 1). Районы с наибольшей среднегодовой ТВП расположены в юго-западной

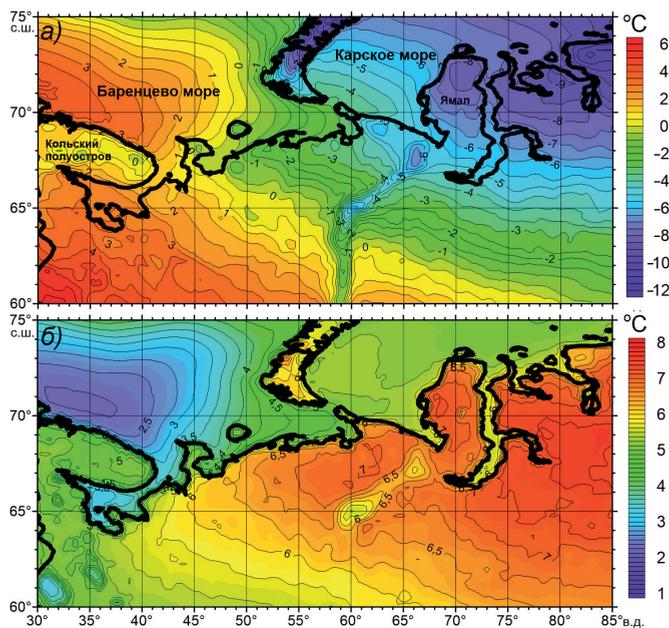


Рис. 1. Средние за период 1980–2022 гг. значения ТВП (а) и стандартные отклонения их аномалий (б) по данным ERA5

Fig. 1. Average surface air temperature (SAT) for the period 1980–2022 (a), and standard deviations of SAT anomalies (b) according to ERA5 data

части исследуемого региона (до  $+6$  °С), где сказывается влияние Балтийского моря и широтная зональность, и в юго-западной части Баренцева моря (до  $+4$  °С), что связано с влиянием теплых атлантических вод, переносимых Норвежским течением в Баренцево море. Нулевая изотерма проходит по восточной части Баренцева моря и далее от полуострова Канин на юго-восток до Уральских гор, которые разделяют АЗРФ условно на теплый западный и холодный восточный сектор (рис. 1а). Наиболее холодными областями являются северная часть Новой Земли, полуостров Ямал и район к востоку от Обской губы, где среднегодовые температуры ниже  $-6$  °С.

Стандартные отклонения аномалий ТВП минимальны ( $2-4$  °С) над Баренцевым и Белым морями, что объясняется стабилизирующим эффектом больших морских акваторий, и максимальны — до  $8$  °С к востоку от  $75^{\circ}$  в. д., что объясняется увеличением континентальности климата к востоку. При этом Карское море, со стандартными отклонениями аномалий ТВП  $4-5$  °С, не оказывает такого стабилизирующего эффекта, как Баренцево и Белое моря (рис. 1б), что может быть связано с различными ледовыми условиями в этих морях, а также с более восточным расположением Карского моря.

Таким образом, на западе исследуемого региона среднегодовые значения ТВП выше, а изменчивость аномалий ТВП ниже, чем на востоке. И весь исследуемый регион западной части Российской Арктики можно условно разделить на 4 района: 1) акватория Баренцева и Белого морей с высокими среднегодовыми значениями ТВП и низкой изменчивостью аномалий ТВП; 2) территория западнее Уральских гор с высокими среднегодовыми значениями ТВП и средней изменчивостью аномалий ТВП; 3) акватория Карского моря и Обской губы с низкими среднегодовыми значениями ТВП и средней изменчивостью аномалий ТВП; 4) территория восточнее Уральских гор с низкими среднегодовыми значениями ТВП и высокой изменчивостью аномалий ТВП. Конечно, из этой условной классификации есть исключения, например юго-восточная часть исследуемого региона с достаточно высокими среднегодовыми значениями ТВП. Но в целом такие основные характеристики ТВП, как среднее значение и изменчивость, имеют близкие величины внутри этих 4 районов, и различия между этими районами существенны.

Затем была построена средняя для исследуемого региона ( $60-75^{\circ}$  с. ш.,  $30-85^{\circ}$  в. д.) гистограмма распределения за 43 года (1980–2022 гг.) количества за год аномалий ТВП и график функции соответствующего нормального распределения (рис. 2а). Для ее построения вычислялись подобные гистограммы в каждом узле сетки исследуемого региона, а затем все эти полученные гистограммы усреднялись. Обращает на себя внимание смещение средней гистограммы в сторону положительных значений практически во всем диапазоне среднеквадратических отклонений (рис. 2а). Данная асимметрия распределения аномалий ТВП показывает, что в исследуемом регионе за исследуемый период дней с положительными аномалиями ТВП наблюдалось больше, чем дней с отрицательными аномалиями. Но при этом значения отрицательных аномалий ТВП по модулю выше, чем значения положительных аномалий, — отрицательный «хвост» распределения «тяжелее», чем положительный.

Для наглядности было построено поле пространственного распределения данной асимметрии (рис. 2б), которое показало, что это смещение наблюдается на большей части исследуемого региона, за исключением его северо-восточной части, в которой наблюдается противоположное смещение — в сторону отрицательных

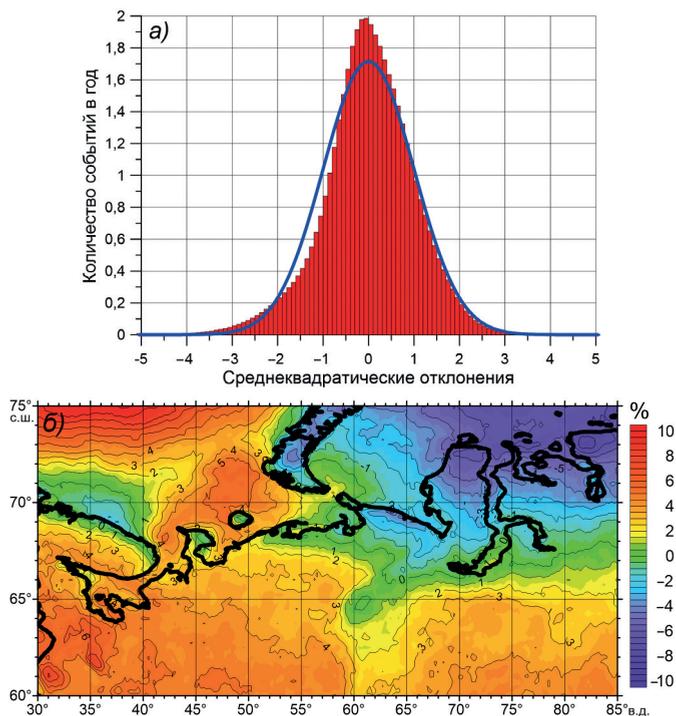


Рис. 2. Гистограмма распределения среднего для региона западной части Российской Арктики (60–75° с. ш., 30–85° в. д.) количества за год аномалий ТВП (красный) по данным ERA5 за период 1980–2022 гг. совместно с графиком функции соответствующего нормального распределения (синий) (а) и поле асимметрии распределения — процент, на который количество положительных аномалий ТВП меньше (знак «-») или больше (знак «+») количества отрицательных аномалий (б)

Fig. 2. Average distribution histogram of the annual average number of SAT anomalies (red columns) from ERA5 data for the period 1980-2022 for the region of the western part of the Russian Arctic (60°–75° N, 30°–85° E) combined with plot of the corresponding normal distribution function (blue line) (a). The distribution asymmetry field — the percentage by which the number of the positive SAT anomalies is less (the “-” sign) or greater (the “+” sign) than the number of negative anomalies (b)

аномалий ТВП. То есть на северо-востоке исследуемого региона дней с отрицательными аномалиями ТВП наблюдалось больше, но при этом величины этих аномалий были по модулю меньше, чем величины положительных аномалий ТВП. Примечательно, что именно на северо-востоке исследуемого региона в [14] был обнаружен отрицательный тренд ТВП в зимний сезон за 1980–2021 гг.

Интересной особенностью поля асимметрии распределения аномалий ТВП (рис. 2б) является то, что наибольшее смещение в сторону положительных аномалий ТВП наблюдается на севере Баренцева моря — там, где происходят сезонные изменения границы распространения морского льда и наблюдается наибольший рост ТВП [14] из-за отступления этой границы на северо-восток [23]. А на юге Баренцева моря — вдоль побережья Кольского полуострова — асимметричность распределения аномалий ТВП практически отсутствует, именно в этом районе в наибольшей степени распространяются по поверхности моря теплые воды из Северной Атлантики [7].

В Карском море также наблюдается интересная особенность поля асимметрии распределения аномалий ТВП (рис. 2б). На юго-западе Карского моря — в районе поступления воды из Баренцева моря — наблюдается смещение распределения в сторону положительных аномалий ТВП, которое уменьшается по мере ослабления влияния вод Баренцева моря, и на юго-востоке Карского моря смещение распределения переходит на сторону отрицательных аномалий. Причины перечисленных выше особенностей распределений аномалий ТВП до конца не ясны, но, возможно, они связаны с сезонами возникновения аномалий. Аномалии одного и того же знака в разные сезоны года могут иметь различные физические свойства. Так, в отличие от лета положительные аномалии ТВП зимой могут привести к оттепелям. Поэтому сезонные особенности экстремальных событий ТВП требуют отдельного исследования.

В дальнейшем рассчитывались, строились и анализировались поля пространственного распределения амплитуды, продолжительности и количества (число событий в году) экстремальных событий с отрицательными и положительными аномалиями ТВП, превосходящими по модулю 2 стандартных отклонения.

Поле средних значений амплитуд экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП показывает, что наименьшие амплитуды (4–8 °C) аномалий ТВП наблюдаются в Баренцевом и Белом морях, а наибольшие — свыше 14 °C — на суше к востоку от 40° в. д. (рис. 3а). Такое распределение объясняется физико-географическими особенностями исследуемого региона, где большая незамерзающая

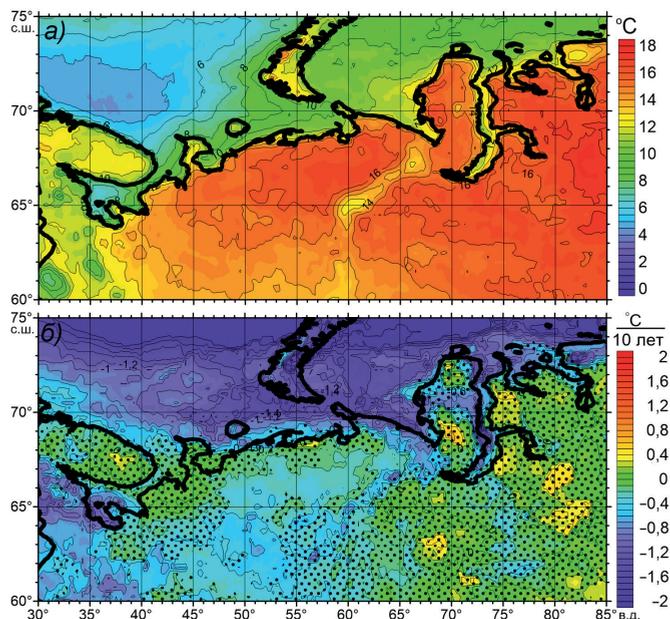


Рис. 3. Средние значения амплитуд экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП (°C) по данным ERA5 (а) и средняя скорость их изменений (коэффициент линейного тренда, °C за 10 лет) за период 1980–2022 гг. (б). Точками отмечены значения, вероятность которых меньше 80 %

Fig. 3. Average amplitude values of extreme events with negative SAT anomalies (°C) according to ERA5 data (a) and the average rate of their changes (linear trend coefficient, °C for 10 years) for the period 1980–2022 (b). The black dots mark values whose probability is less than 80 %

морская акватория Баренцева моря оказывает сглаживающий эффект на изменчивость ТВП. Для суши восточной части исследуемого региона с наибольшими амплитудами аномалий ТВП характерна сильная континентальность климата, которая проявляется в сильном выхолаживании поверхности зимой и сильном прогреве летом, обычно в условиях ясной погоды на фоне антициклонов.

Поле коэффициентов линейного тренда изменений средней амплитуды экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП ( $^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) показывает, что амплитуды отрицательных аномалий ТВП быстрее всего уменьшаются по модулю (до  $2^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) в Баренцевом и Карском морях, а также в Карелии и на юге Белого моря (рис. 3б). Уменьшение амплитуды отрицательных аномалий ТВП над морями можно объяснить изменениями ледовой обстановки. Здесь и далее точками отмечена достоверность этих трендов с вероятностью менее 80 %.

Поле средних значений амплитуд экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП показывает, что наименьшие амплитуды ( $3\text{--}8^{\circ}\text{C}$ ) положительных аномалий ТВП наблюдаются в Баренцевом и Белом морях, а наибольшие — свыше  $14^{\circ}\text{C}$  — на суше к востоку от  $65^{\circ}$  в. д. (рис. 4а). Такое распределение объясняется теми же факторами, что и в случае отрицательных аномалий ТВП. Амплитуды экстремальных событий ТВП над Белым морем выше, чем над Баренцевым, а над Карским морем выше, чем над Белым (рис. 3а и рис. 4а). По всей видимости, это связано с различиями в географическом положении

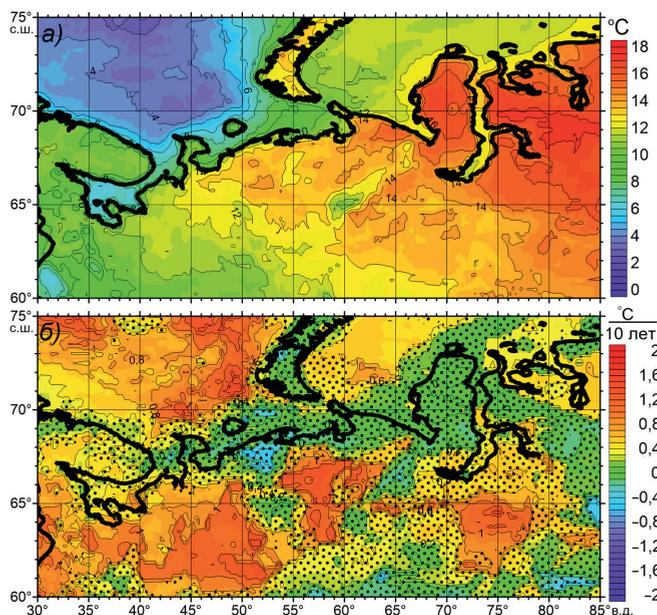


Рис. 4. Средние значения амплитуд экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП ( $^{\circ}\text{C}$ ) по данным ERA5 (а) и средняя скорость их изменений (коэффициент линейного тренда,  $^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) за период 1980–2022 гг. (б). Точками отмечены значения, вероятность которых меньше 80 %

Fig. 4. Average amplitude values of extreme events with positive SAT anomalies ( $^{\circ}\text{C}$ ) according to ERA5 data (a) and the average rate of their changes (linear trend coefficient,  $^{\circ}\text{C}$  for 10 years) for the period 1980–2022 (b). Black dots mark values whose probability is less than 80 %

и ледовой обстановке этих морей. При этом амплитуды экстремальных событий ТВП над водной поверхностью, как правило, имеют существенные отличия от амплитуд над соседствующей сушей.

Поле линейных трендов изменений средней амплитуды экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП показывает, что амплитуды положительных аномалий ТВП растут с наибольшей скоростью от 0,4 до 1,4 °C за 10 лет в Баренцевом море, в Белом море и Карелии, к юго-востоку от Белого моря, к югу от Печорского моря, к югу от Обской губы и в Карском море (рис. 4б).

Таким образом, пространственное распределение амплитуды экстремальных событий в целом демонстрирует понижение амплитуды аномалий ТВП при экстремальных событиях отрицательного знака и повышение амплитуды экстремальных событий при положительном знаке аномалий ТВП (рис. 3 и 4). Сильный рост амплитуды экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП наблюдается в восточной части Баренцева моря, там, где за исследуемый период произошло существенное сокращение концентрации морского льда (см. рис. 7 в [23]) и повышение ТВП [14]. Таким образом, изменения амплитуд экстремальных событий ТВП во многом соответствуют обнаруженным в [14] междекадным изменениям ТВП в западной части Российской Арктики. Из этого можно заключить, что изменения нормы во многом определяют изменения амплитуды аномалий ТВП при экстремальных событиях.

Однако из-за действия локальных физико-географических эффектов и нелинейности климатической системы существуют районы, например такие, как район юго-восточнее Белого моря и район к югу от Печорского моря, в которых амплитуды положительных аномалий ТВП при экстремальных событиях увеличиваются в большей степени по сравнению с соседними регионами (рис. 4б), при практически одинаковых междекадных изменениях ТВП [14]. Так, на рис. П2 статьи [14] видно, что ТВП в районах юго-восточнее Белого моря и к югу от Печорского моря выросла в 1980–2021 гг. практически так же, как и в соседних с ними районах. Но при этом рост амплитуд аномалий ТВП при экстремальных событиях положительного знака в этих районах существенно превышает их рост в соседних районах (рис. 4б).

Пространственное распределение средних значений продолжительности (в сутках) экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП показывает, что средняя продолжительность таких экстремальных событий превышает почти повсеместно 2 суток, причем максимум до 3 суток наблюдается в южной части Баренцева моря, в Белом море и на юге Карского моря (рис. 5а). События продолжительностью менее 2 суток наблюдаются в юго-западной части Баренцева моря. Наиболее заметная, двукратная разница в длине экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП наблюдается между юго-западной (1,5 суток) и юго-восточной (3 суток) частями Баренцева моря. Причины данного различия до конца не ясны, но могут быть связаны с особенностями циркуляции атмосферы в данном регионе [14, 23] и местными физико-географическими свойствами.

Пространственное распределение средней скорости изменений продолжительности экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП показывает, что над Баренцевым и Карским морями длина таких событий уменьшается со скоростью от 0,3 до 1 суток за 10 лет, причем чем севернее — тем сокращение продолжи-

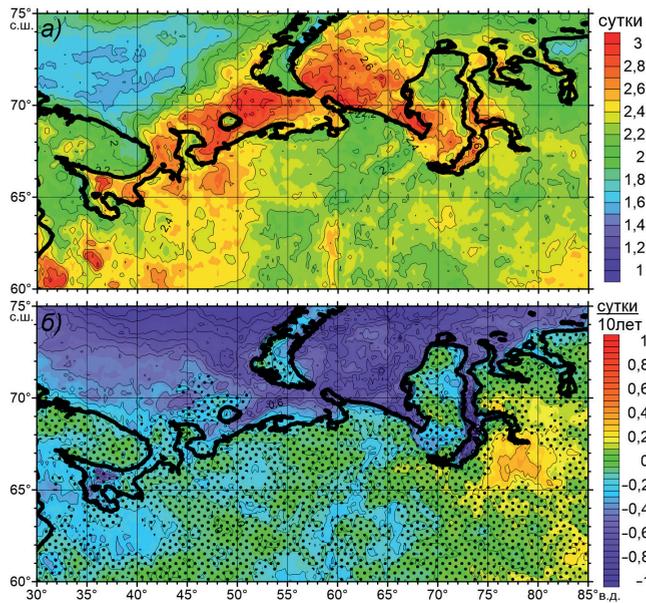


Рис. 5. Средние значения продолжительности (число суток) экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП по данным ERA5 (а) и средняя скорость их изменений за период 1980–2022 гг. (б). Точками отмечены значения, вероятность которых меньше 80 %

Fig. 5. Average duration (number of days) of extreme events with negative SAT anomalies according to ERA5 data (a) and the average rate of their changes for the period 1980–2022 (b). Black dots mark values whose probability is less than 80 %

тельности происходит быстрее (рис. 5б). Данное сокращение продолжительности экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП хорошо согласуется с сокращением амплитуды этих событий в данных морях (рис. 3б). В Белом море наблюдаются меньшие скорости сокращения продолжительности таких событий. Единственный район, где продолжительность отрицательных аномалий достоверно растет, — это регион к востоку от 75° в. д., где она растет со скоростью от 0,2 до 0,5 суток за 10 лет.

Пространственное распределение средних значений продолжительности (в сутках) экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП показывает, что средняя длина таких экстремальных событий варьируется на большей части региона от 1 до 2 суток, с минимумом около 1 суток над Баренцевым морем и максимумом более 2 суток над Карским морем (рис. 6а). Причины данного сильного различия между Баренцевым и Карским морями до конца не ясны, но они могут быть связаны с отличиями в ледовой обстановке в этих морях и разной степенью континентальности.

Пространственное распределение средней скорости изменений продолжительности экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП показывает, что большие и достоверные скорости увеличения длины таких событий от 0,2 до 0,5 суток за 10 лет наблюдаются над акваторией Баренцева и особенно Карского морей (рис. 6б). Не такой сильный (0,1–0,3 суток за 10 лет), но все-таки статистически значимый рост продолжительности экстремальных событий с положительными

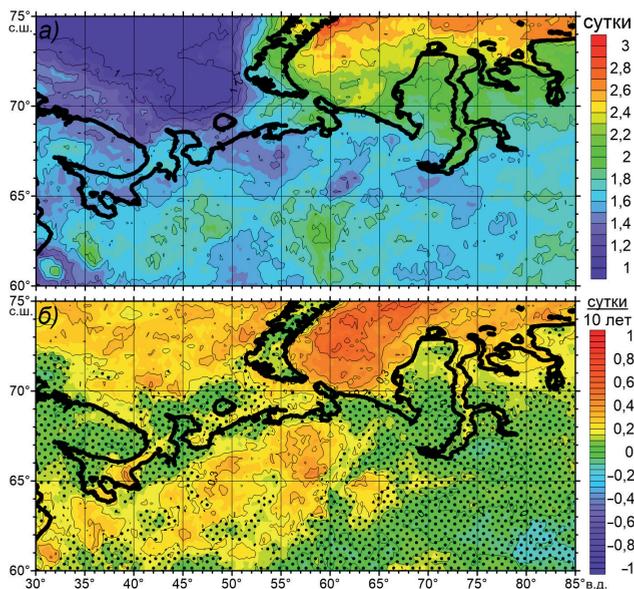


Рис. 6. Средние значения продолжительности (число суток) экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП по данным ERA5 (*a*) и средняя скорость их изменений за период 1980–2022 гг. (*б*). Точками отмечены значения, вероятность которых меньше 80 %

Fig. 6. Average duration (number of days) of extreme events with positive SAT anomalies according to ERA5 data (*a*) and the average rate of their changes for the period 1980–2022 (*b*). Black dots mark values whose probability is less than 80 %

аномалиями ТВП наблюдается в районах юго-восточнее Белого моря и южнее Печорского моря — там же, где и зафиксировано увеличение амплитуды этих событий (рис. 4*б*). Таким образом, можно заключить, что экстремальные события с положительными аномалиями ТВП усиливаются в Баренцевом и Карском морях, а также в районах юго-восточнее Белого моря и южнее Печорского моря.

Пространственное распределение средних значений количества экстремальных событий за год с отрицательными аномалиями ТВП показывает, что среднее количество таких событий на большей части исследуемого региона варьируется от 5 до 6 в год, и только над Белым морем и частью акватории Баренцева и Карского морей оно варьируется от 4 до 5 событий в год (рис. 7*а*).

Пространственное распределение средней скорости изменений количества экстремальных событий в год с отрицательными аномалиями ТВП показывает, что количество таких событий на большей части исследуемой территории и акватории достоверно уменьшается (рис. 7*б*). Так, над Баренцевым морем их количество уменьшается со скоростью от 1 до 3 за 10 лет, в Карском море от 1 до 2 за 10 лет. Таким образом, число экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП над Баренцевым морем за 1980–2022 гг. сократилось практически до 0. Это является основанием для того, чтобы предположить, что климат Баренцева моря во второй части рассматриваемого периода перешел в новое состояние и число экстремальных событий над ним нужно считать относительно нового среднего значения.

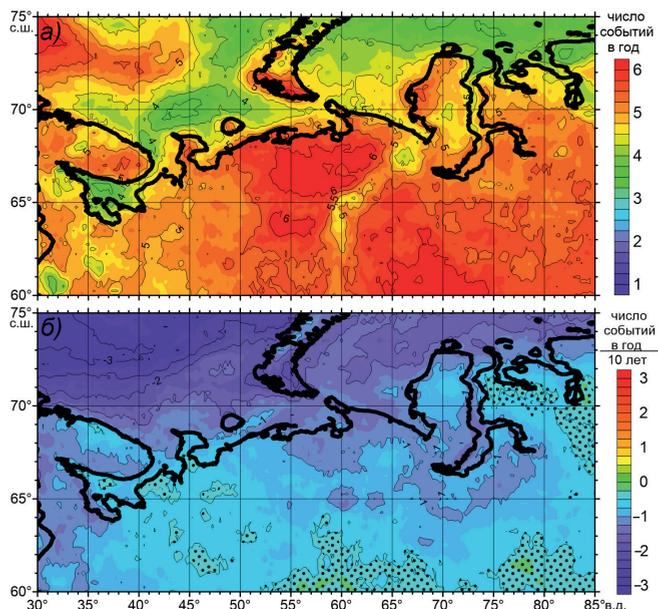


Рис. 7. Средние значения количества (число событий в год) экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП по данным ERA5 (*a*) и средняя скорость их изменений за период 1980–2022 гг. (*б*). Точками отмечены значения, вероятность которых меньше 80 %

Fig. 7. Average number (number of events during one year) of extreme events with negative SAT anomalies according to ERA5 data (*a*) and the average rate of their changes for the period 1980–2022 (*b*). Black dots mark values whose probability is less than 80 %

Пространственное распределение средних значений количества экстремальных событий за год с положительными аномалиями ТВП показывает, что среднее количество таких событий минимально (от 1 до 3 в год) над акваторией Баренцева моря и максимально (от 4 до 6 в год) в регионе Карского моря (рис. 8*a*). Столь сильная разница между Баренцевым и Карским морями в числе этих событий соответствует разнице между этими морями и в продолжительности таких же событий (рис. 6*a*). Из этого можно заключить, что экстремальные события с положительными аномалиями ТВП в Карском море происходят гораздо чаще и длятся существенно дольше, чем в Баренцевом море. Над большей частью всей остальной территории количество таких событий варьируется от 2 до 4 в год, что меньше, чем число событий с отрицательными аномалиями (4–6 в год) (рис. 7*a*). Это согласуется с распределения аномальных событий (рис. 2), где наблюдается более «тяжелый хвост» отрицательных аномалий с величинами по модулю более 2 стандартных отклонений. Таким образом, можно подтвердить заключение о том, что в исследуемом регионе происходит больше экстремальных событий с сильными отрицательными аномалиями ТВП, чем с сильными положительными.

Пространственное распределение средней скорости изменений количества экстремальных событий в год с положительными аномалиями ТВП показывает, что количество таких событий над примерно половиной исследуемого региона растет со скоростью около 0,5 события за 10 лет (рис. 8*б*). Причем наиболее заметно этот рост проявляется над акваториями Баренцева, Белого и Карского морей.

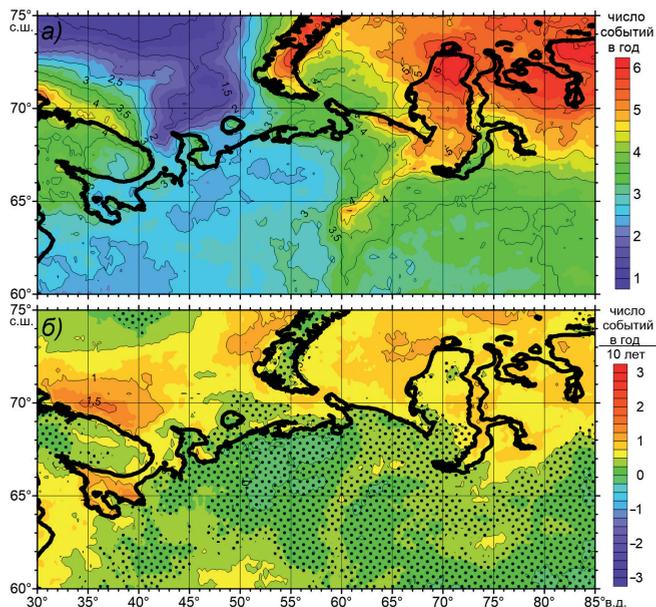


Рис. 8. Средние значения количества (число событий в год) экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП по данным ERA5 (а) и средняя скорость их изменений за период 1980–2022 гг. (б). Точками отмечены значения, вероятность которых меньше 80 %

Fig. 8. Average number (number of events during one year) of extreme events with positive SAT anomalies according to ERA5 data (a) and the average rate of their changes for the period 1980–2022 (b). Black dots mark values whose probability is less than 80 %

### Обсуждение результатов

Анализ изменений характеристик экстремальных событий положительных и отрицательных аномалий ТВП западной части Российской Арктики для каждого узла сетки реанализов ERA5 и MERRA-2 в отдельности позволил впервые оценить пространственное распределение междекадных изменений этих событий на основе подробных полей, а не графиков отдельных метеостанций или осредненных по пространству величин. Хорошее совпадение соответствующих результатов, полученных по реанализам ERA5 и MERRA-2, свидетельствует об их достоверности и значимости. Тем не менее мы считаем, что полученные результаты требуют дополнительных проверок по данным метеостанций, которые планируется выполнить в дальнейших исследованиях.

Несмотря на то, что все реанализы могут содержать систематические ошибки и не способны точно воспроизводить ни средние значения, ни тем более экстремумы величин, многочисленные работы российских и зарубежных ученых об изменении климата основаны именно на данных реанализов [1–4, 11, 12, 17, 18, 20, 22, 27, 28], которые проигрывают по точности измерений, но выигрывают по пространственному покрытию (даже с грубым пространственным разрешением), особенно по акваториям океанов и морей, а также арктической зоны, где сеть гидрометеорологических станций отсутствует либо весьма редка. Авторы данной статьи не ставили своей целью проверку реанализов ERA5 и MERRA-2 и сравнение данных ТВП с данными гидрометеорологических станций в исследуемом регионе, поскольку

это отдельная и сложная задача. Разработке, совершенствованию и тестированию реанализов, включая ERA5 и MERRA-2, посвящены десятки специализированных работ, которые доказали их эффективную применимость для решения различных задач в климатологии [16–18, 20, 29–35].

Проведенное исследование экстремальных температурных событий в западной части Российской Арктики за 1980–2022 гг. показало, что существуют значительные различия в изменении величины аномалий ТВП, их продолжительности и частоты встречаемости по исследуемой территории и особенно по акваториям Баренцева и Карского морей. Кроме этого, часто выделяются акватории Печорского моря, Белого моря и Обской губы, которые также обладают своими характерными особенностями. На суше территория к востоку от 70–75° в. д. также часто отличается по своим характеристикам от западной части исследуемого региона и особенно от территории Карелии и Кольского полуострова.

Положительные и отрицательные аномалии ТВП также ведут себя по-разному для разных территорий и акваторий, что отражается в пространственной изменчивости амплитуд аномалий ТВП, продолжительности экстремальных событий и в их количестве за год, а также в линейных трендах изменений этих характеристик.

В целом можно сделать вывод о том, что экстремальные события с положительными аномалиями ТВП усиливаются, удлиняются и учащаются над частью акваторий Баренцева, Карского и Белого морей, а также над некоторыми участками суши западной части исследуемого региона. При этом амплитуда, продолжительность и число экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП в этих районах сокращаются. Все это указывает на то, что найденные изменения экстремальных событий вызваны изменением климатической нормы, относительно которой рассматриваются аномалии ТВП.

Полученные результаты согласуются с исследованиями J. Overland [3], который для морских волн тепла в Баренцевом море (экстремальных аномалий температуры поверхности моря выше 95 перцентиля диапазона аномалий за 1982–2011 гг. и продолжительностью 5 последовательных дней) показал, что их интенсивность, продолжительность и частота растут. Косвенно полученные данные согласуются и с выводами Isaksen et al. [2], которые показали беспрецедентное повышение среднегодовой температуры приземного воздуха над северной частью Баренцева моря на 5,4 °C за 2001–2020 гг.

Наши результаты вполне соответствуют результатам, полученным в работе О.Н. Бульгиной и др. [25], в которой приведены поля только линейных трендов частоты встречаемости среднесуточных положительных или отрицательных температур воздуха за период 1951–2006 гг. или 1977–2006 гг. и только для территории Российской Федерации (акватории морей исключены из анализа). Авторы показали, что количество аномально теплых дней в среднем растет со скоростью 0,5–1 суток за 10 лет в регионе нашего исследования, за исключением Новой Земли, Ямала и района Обской губы, где это количество уменьшается со скоростью 0,5–1 суток за 10 лет. В декабре-феврале количество аномально холодных дней растет со скоростью 0,5 суток за 10 лет также за исключением Новой Земли, Ямала и района Обской губы, где это количество уменьшается со скоростью 0,5 суток за 10 лет. В июне-августе эта характеристика уменьшается со скоростью 0,5 суток за 10 лет во всем исследуемом нами регионе. В нашем случае количество событий с отрицательными

экстремальными аномалиями ТВП уменьшается со скоростью от 0,5 до 3 событий в год за 10 лет, причем наибольшее уменьшение от 1 до 3 событий в год за 10 лет отмечено именно на акваториях Баренцева и Карского морей, которые исключены из анализа в работе [25].

Было бы интересно сравнить наши данные с результатами, полученными А.Н. Шиховым и др. [26], которые проанализировали данные о температуре воздуха за 1951–2015 гг. на 99 метеостанциях в районе Урала (примерно 50–70° с. ш., 45–75° в. д.), который попадает в середину нашего региона исследования. Однако авторы этой статьи исследовали только экстремально высокие и экстремально низкие температуры в году, например выше +30 °С или ниже –30 °С, а также количество дней с такими аномалиями и их междекадную изменчивость. К сожалению, сравнить эти данные с нашими результатами не представляется возможным, поскольку сезонный ход из нашего анализа убран и мы рассчитываем положительные или отрицательные аномалии ТВП для каждого дня года.

Следует отметить, что сравнение полученных результатов пространственно-временной изменчивости экстремальных температурных явлений и с другими работами, например [1, 4, 11, 12], также затруднено, поскольку авторы этих и других работ применяют различные методы оценки и характеристики экстремальных явлений, что делает невозможным прямое сопоставление результатов. Это является следствием отсутствия единой методологии исследования экстремальных явлений.

Полученные результаты касаются характеристик экстремальных аномалий ТВП относительно 1980–2022 гг., но за этот период климат исследуемого региона существенно изменился [14, 15]. Поэтому из-за вычисления аномалий ТВП относительно среднего годового хода за 1980–2022 гг. часть обнаруженных изменений экстремальных событий является следствием смещения климатической нормы в этот период. При этом из-за нелинейных свойств динамики климатической системы часть обнаруженных изменений экстремальных событий является следствием влияния локальных физико-географических факторов. Для выделения районов с такими факторами построены поля изменений амплитуды экстремальных событий после предварительного удаления линейных трендов из аномалий ТВП за 1980–2022 гг. (рис. 9).

Поле изменений амплитуды экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП после предварительного удаления линейных трендов (рис. 9а) отличается от аналогичного поля без удаления линейных трендов (рис. 3б) — области сокращения таких амплитуд после удаления линейных трендов стали меньше по площади, а области увеличения — больше. Поле изменений амплитуды экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП после удаления линейных трендов из данных (рис. 9б) существенно отличается от аналогичного поля без удаления линейных трендов (рис. 4б). На поле с удаленными линейными трендами (рис. 9б) на севере и востоке Баренцева моря наблюдается уменьшение амплитуды экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП в отличие от поля рис. 4б. Это может быть объяснено сокращением площади морского льда в этом районе [23], вследствие чего на ТВП усилилось влияние температуры воды Баренцева моря, обладающей большой инерцией, и произошло сокращение изменчивости ТВП. Таким образом, если принять изменившееся среднее значение ТВП за новую климатическую норму, то на севере и востоке Баренцева моря амплитуда экстремальных событий сократи-

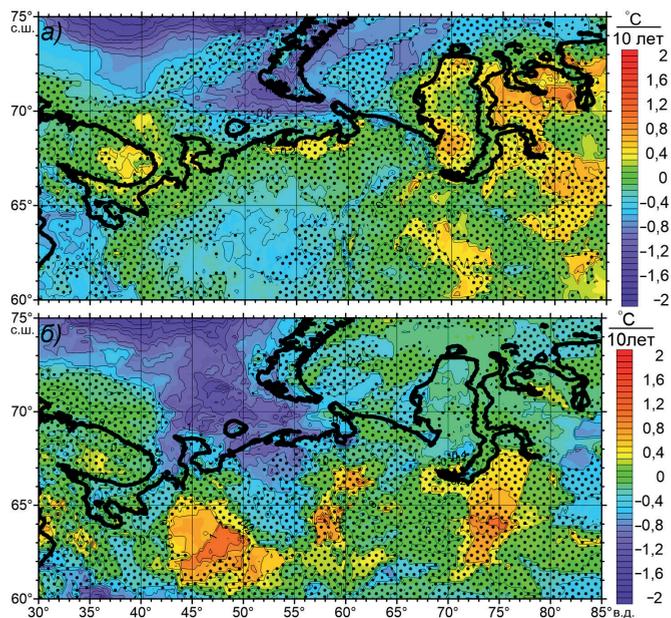


Рис. 9. Изменения амплитуды экстремальных событий с отрицательными (а) и положительными (б) аномалиями ТВП после удаления линейных трендов из данных ERA5 за 1980–2022 гг. Точками отмечены значения, вероятность которых меньше 80 %

Fig. 9. Changes in the amplitude of extreme events with negative (a) and positive (b) SAT anomalies after removing linear trends from the ERA5 data for 1980–2022. The dots mark the values the probability of which is less than 80 %

лась как для отрицательных, так и для положительных аномалий ТВП. В районе же юго-восточнее Белого моря наблюдается рост амплитуды экстремальных событий с аномалиями ТВП положительного знака и после удаления линейных трендов из данных (рис. 9б). Вследствие чего можно предположить существование в этом районе неких локальных эффектов, усиливающих этот рост, природа которых требует дополнительного исследования.

Подводя итоги обсуждения полученных результатов, можно заключить, что обнаруженное усиление, удлинение и учащение экстремальных событий с аномалиями ТВП положительного знака должно привести к повышению числа аномально жарких дней в летний сезон и к увеличению оттепелей в зимний, которые, в свою очередь, могут стать причиной зимних паводков на реках западной части Российской Арктики.

## Выводы

В данной работе на основе среднесуточных данных атмосферных реанализов ERA5 и MERRA-2 за 1980–2022 гг. проведен анализ междекадных изменений температурных экстремальных событий (явлений) западной части Российской Арктики (60–75° с. ш., 30–85° в. д.) отдельно для положительных и отрицательных аномалий температуры воздуха у поверхности. При этом экстремальными событиями мы считали аномалии ТВП, которые превосходили по модулю 2 стандартных отклонения непрерывно на протяжении одних или более суток.

Показано, что за 1980–2022 гг. над частью акватории Баренцева, Карского и Белого морей, а также над некоторыми районами суши исследуемого региона увеличились амплитуда, продолжительность и количество экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП. При этом в указанных районах произошло сокращение перечисленных выше характеристик экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП.

Обнаружено, что в районе юго-восточнее Белого моря рост амплитуды экстремальных событий с положительными аномалиями ТВП превышает средний рост этой амплитуды в соседних регионах. Причем этот рост сохраняется и после предварительного удаления линейных трендов из данных, что может быть объяснено влияющими на него дополнительными факторами.

В целом можно сделать вывод о том, что в западной части Российской Арктики амплитуды положительных экстремальных аномалий ТВП в среднем растут со скоростью около 0,5 °C за 10 лет. Продолжительность положительных экстремальных аномалий ТВП растет со скоростью около 0,2 суток за 10 лет, а их число увеличивается со средней скоростью около 0,5 событий в год за 10 лет. При этом аналогичные характеристики экстремальных событий с отрицательными аномалиями ТВП сокращаются приблизительно на такие же величины.

Полученные результаты существенно расширяют наши знания о пространственно-временных особенностях происходящих климатических изменений экстремальности температуры западной части Российской Арктики, что имеет важнейшее значение для анализа и прогноза развития природных и социально-экономических систем в исследуемом регионе.

**Конфликт интересов.** Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

**Финансирование.** И.В. Серых выполнил данное исследование в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2021-0003 «Крупномасштабные, волновые и вихревые океанские процессы и роль океана в формировании климата: междекадная эволюция циркуляции, гидрофизических полей океана и потоков на границе океан-атмосфера в условиях меняющегося климата». А.Г. Костяной выполнил данное исследование в рамках проекта РНФ № 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта» (2021–2024 гг.).

**Благодарности.** Авторы выражают свою благодарность двум анонимным рецензентам за их внимание к работе, их благожелательную критику и сделанные замечания, учет которых позволил коренным образом повысить качество работы.

**Competing interests.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** I.V. Serykh carried out this study within the Federal assignment to the Shirshov Institute of Oceanology RAS on the Project N FMWE-2021-0003 “Large-scale, wave and eddy ocean processes and the role of the ocean in climate formation: interdecadal evolution of circulation, ocean hydrophysical fields and flows at the ocean-atmosphere boundary in a changing climate”. A.G. Kostianoy carried out this study in the framework of the Russian Science Foundation Project N 21-77-30010 “System analysis of the dynamics of geophysical processes in the Russian Arctic and their impact on the development and functioning of the railway transport infrastructure” (2021–2024).

**Acknowledgments.** The authors express their gratitude to the anonymous reviewers for their attention to the work, their positive criticisms and comments, which allowed us to significantly improve the quality of the work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Катцов В.М. (ред.) *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. СПб.: Научно-технологические технологии; 2022. 126 с. [https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf\\_download/compressed.pdf](https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf) (дата обращения: 01.12.2023)  
Kattsov V.M. (ed.) *Third assessment report on climate change and their consequences on the territory of the Russian Federation*. St. Petersburg: Science-intensive technologies; 2022. 126 p. (In Russ.) [https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf\\_download/compressed.pdf](https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf) (accessed: 01.12.2023)
2. Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Køltzow M.A.Ø., Aaboe S., Gjelten H.M., Mezghani A., Eastwood S., Førland E., R.E. Benestad, Hanssen-Bauer I., Brækkan R., Sviashchennikov P., Demin V., Revina A., Karandasheva T. Exceptional warming over the Barents area. *Sci. Rep.* 2022; 12: 9371. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>
3. Overland J. Arctic Climate Extremes. *Atmosphere.* 2022;13(10):1670. <https://doi.org/10.3390/atmos13101670>
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
5. Kostianoy A.G., Serykh I.V., Ekba Ya.A., Kravchenko P.N. Climate variability of extreme air temperature events in the Eastern Black Sea. *Ecologica Montenegrina.* 2017; 14:21–29.
6. Kostianoy A.G., Serykh I.V., Kostianoa E.A. Climate change in the Lake Skadar region. In: Pesic V., Karaman G., Kostianoy A.G. (eds.) *The Skadar/Shkodra Lake Environment*. Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland; 2018. P. 63–88.
7. Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Баренцева моря и их возможных причинах. В кн.: Лисицин А.П. (ред.) *Система Баренцева моря*. М.: Геос; 2021. С. 166–179. <https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8>
8. Nastos P.T., Kostianoy A.G., Serykh I.V., Chronis T. The Aegean Sea air temperature changes. In: Anagnostou C., Kostianoy A., Mariolakos I., Panayotidis P., Soilemezidou M., Tsaltas G. (eds.) *The Aegean Sea Environment: Anthropogenic Presence and Impact*. Cham: Springer International Publishing AG; 2023. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22290-4>
9. Кислов А.В., Матвеева Т.А., Платонов В.С. Экстремумы скорости ветра в Арктике. *Фундаментальная и прикладная климатология.* 2015;2:63–80.  
Kislov A.V., Matveeva T.A., Platonov V.S. Wind speed extremes in the Arctic. *Fundamental and Applied Climatology.* 2015;2: 63–80. (In Russ.)
10. Кислов А.В., Матвеева Т.А. Экстремумы скорости ветра в Европейском секторе Арктики. *Метеорология и гидрология.* 2016;7:5–14.  
Kislov A.V., Matveeva T.A. Wind speed extremes in the European sector of the Arctic. *Meteorology and Hydrology.* 2016;41: 447–454. <https://doi.org/10.3103/S1068373916070013>
11. Duntsev S., Platonov V. Quality assessment of surface temperature reproduction by a model archive, the COSMO-CLM Russian Arctic hindcast, based on station data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022; 1023(1):012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1023/1/012007>
12. Zheleznova I. V., Gushchina D. Yu. Variability of extreme air temperatures and precipitation in different natural zones in the late 20th and early 21st centuries according to ERA5 reanalysis data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2023; 59(5): 479–488.
13. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Муравьев А.В. Экстремальные метеорологические явления на сезонных и внутрисезонных интервалах времени в контексте изменения климата. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы.* 2021; 1(379): 36–57. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-36-57>

- Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Murav'ev A.V. Extreme weather events on seasonal and intraseasonal timescales in the context of climate change. *Gidrometeorologicheskie issledovaniia i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasts*. 2021; 1(379): 36–57. (In Russ.)
14. Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 1. Температура воздуха, осадки, ветер. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022; 68(3): 258–277. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277>  
Serykh I.V., Tolstikov A.V. Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 1. Air temperature, precipitation, wind. *Arctic and Antarctic Research*. 2022; 68(3): 258–277. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277>
15. Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 2. Температура почвы, снег, влажность. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022; 68(4): 352–369. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369>  
Serykh I.V., Tolstikov A.V. Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 2. Soil temperature, snow, humidity. *Arctic and Antarctic Research*. 2022; 68(4): 352–369. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369>
16. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Sabater J.M., Nicolas J.P., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D.P., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R.M., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S., Hogan R., Holm E.V., Janiskova M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnóti G., De Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Sébastien V., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020; 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
17. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A. M., Gu W., Kim G., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*. 2017; 30(14): 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
18. Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., da Silva A., Gu W., Joiner J., Koster R.D., Lucchesi R., Molod A., Owens T., Pawson S., Pegion P., Redder C.R., Reichle R., Robertson F.R., Ruddick A.G., Sienkiewicz M., Woollen J. MERRA: NASA's Modern-Era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*. 2011; 24(14): 3624–3648. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00015.1>
19. Molod A., Takacs L., Suarez M., Bacmeister J. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA-2. *Geosci. Model Dev. Discuss*. 2015; 8(5): 1339–1356. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1339-2015>
20. Wu W.-S., Purser R.J., Parrish D.F. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. *Mon. Wea. Rev.* 2002; 130: 2905–2916. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2905:TDVAWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2905:TDVAWS>2.0.CO;2)
21. Luo B., Minnett, P.J., Szczodrak M., Nalli N.R., Morris V.R. Accuracy assessment of MERRA-2 and ERA-Interim sea-surface temperature, air temperature and humidity profiles over the Atlantic Ocean using AEROS measurements. *Journal of Climate*. 2020; 33(16): 6889–6909. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0955.1>
22. Gvishiani A.D., Rozenberg I.N., Soloviev A.A., Kostianoy A.G., Gvozdik S.A., Serykh I.V., Krasnoperov R.I., Sazonov N.V., Dubchak I.A., Popov A.B., Kostianiaia E.A., Gvozdik G.A. Electronic atlas of climatic changes in hydrometeorological parameters of the western part of the Russian Arctic for 1950–2021 as geoinformatic support of railway development. *Applied Sciences*. 2023; 13(9): 5278. <https://doi.org/10.3390/app13095278>
23. Серых И.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Костяная Е.А. О переходе температурного ре-

- жима региона Белого моря в новое фазовое состояние. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022; 15(1): 98–111. <https://doi.org/10.59887/fpg/k9x4-p8fz-5kz6>
- Serykh I.V., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Kostianaia E.A. On the transition of temperature regime of the White Sea Region to a new phase state. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022; 15(1): 98–111. <https://doi.org/10.59887/fpg/k9x4-p8fz-5kz6>
24. Serykh I.V., Kostianoy A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature. *Ecologica Montenegrina*. 2019; 25: 1–13.
25. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Groisman P.Y. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia. *Environmental Research Letters*. 2007; 2(4): 045020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045020>
26. Shikhov A.N., Abdullin R.K., Tarasov A.V. Mapping temperature and precipitation extremes under changing climate (on the example of The Ural region, Russia). *Geography, Environment, Sustainability*. 2020; 13(2): 154–165. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-42>
27. Cornes R.C., Jones P.D. How well does the ERA-Interim reanalysis replicate trends in extremes of surface temperature across Europe? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013; 118(18): 10262–10276. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50799>
28. Lan H., Guo D., Hua W., Pepin N., Sun J. Evaluation of reanalysis air temperature and precipitation in high-latitude Asia using ground-based observations. *International Journal of Climatology*. 2023; 43(3): 1621–1638. <https://doi.org/10.1002/joc.7937>
29. Bosilovich M. G. Regional climate and variability of NASA MERRA and recent reanalyses: U.S. summertime precipitation and temperature. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2013; 52(8): 1939–1951. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0291.1>
30. Tilinina N., Gulev S.K., Rudeva I., Koltermann K.P. Comparing cyclone life cycle characteristics and their interannual variability in different reanalyses. *J. Clim.* 2013; 26: 6419–6438. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00777.1>
31. Bentamy A., Piollé J.F., Grouazel A., Danielson R., Gulev S., Paul F., Azelmat H., Mathieu P.P., von Schuckmann K., Sathyendranath S., Evers-King H., Esau I., Johannessen J.A., Clayton C.A., Pinker R.T., Grodsky S.A., Bourassa M., Smith S.R., Haines K., Valdivieso M., Josey S.A. Review and assessment of latent and sensible heat flux accuracy over the global oceans. *Remote Sens. Environ.* 2017; 201: 196–218. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.016>
32. Schubert S.D., Chang Y., DeAngelis A.M., Koster R.D., Lim Y., Wang H. Exceptional warmth in the Northern Hemisphere during January–March of 2020: The roles of unforced and forced modes of atmospheric variability. *J. Clim.* 2022; 35(8): 2565–2584. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0291.1>
33. Taszarek M., Pilguy N., Allen J.T., Gensini V., Brooks H.E., Szuster P. Comparison of convective parameters derived from ERA5 and MERRA-2 with Rawinsonde data over Europe and North America. *J. Climate*. 2021; 34: 3211–3237. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0484.1>
34. Koster R.D., McCarty W., Coy L., Gelaro R., Huang A., Merkova D., Smith E.B., Sienkiewicz M., Wargan K. MERRA-2 input observations: summary and assessment. In: Randal D. Koster (ed.) *Technical report series on global modeling and data assimilation*. NASA/TM-2016-104606. 2016; 46. 51 p. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160014544.pdf>. (accessed: 20.11.2023)
35. Shafiee M., Maadani O., Cobo J.H. Comparison between MERRA-2 and CWEDDS for use in pavement mechanistic-empirical design in Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2023; 50(9). <https://doi.org/10.1139/cjce-2022-0384>