

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277>
УДК 551.582



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 1. Температура воздуха, осадки, ветер

И.В. Серых^{1,2}, А.В. Толстиков³*

¹ — *Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия*

² — *Геофизический центр РАН, Москва, Россия*

³ — *Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН,
Петрозаводск, Россия*

**iserykh@ocean.ru*

Резюме

По среднемесячным данным реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 исследованы климатические изменения температуры воздуха, количества атмосферных осадков и скорости ветра в регионе западной части Российской Арктики (60–75° с. ш., 30–85° в. д.) за 1980–2021 гг. Показаны существенные изменения этих параметров между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг., причем наиболее сильное увеличение температуры наблюдалось для ноября и апреля, что свидетельствует о произошедшем смещении границ сезонов — более позднем начале и раннем завершении зимы. Обнаружено, что в период 2001–2021 гг. температура быстрее всего росла в акваториях Баренцева и Карского морей и этот рост происходил с ускорением. Найдены отрицательные изменения температуры в зимний сезон в районах впадения крупных рек в Баренцево и Карское моря. Выдвинута гипотеза, что это вызвано обнаруженным увеличением количества осадков на водосборе этих рек в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. Показано, что обнаруженное увеличение количества осадков связано с существенным изменением циркуляции атмосферы в исследуемом регионе. В летний сезон и сентябре в исследуемом регионе произошло усиление западного ветра. В зимний сезон 2001–2021 гг. в Баренцевом и Карском морях произошло усиление южного ветра по сравнению с 1980–2000 гг.

Ключевые слова: арктическое усиление, атлантификация Арктики, Баренцево море, Белое море, гидрометеорологические параметры, Карское море, климатический сдвиг, обратные связи, потепление климата, северо-запад России, циркуляция атмосферы.

Для цитирования: 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. Т. 68. № 3. С. 258–277. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277>.

Поступила 10.07.2022

После переработки 13.09.2022

Принята 15.09.2022

Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021.**Part 1. Air temperature, precipitation, wind***Ilya V. Serykh^{1,2*}, Alexei V. Tolstikov³*¹ — *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*² — *Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*³ — *Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk, Russia***iserykh@ocean.ru***Summary**

The warming of the Arctic climate is confirmed by changes in the main hydrometeorological values of the atmosphere and ocean over a long period of time, and it is most pronounced in the recent decades. Based on monthly average data from the reanalysis of NASA MERRA-2 satellite measurements, we studied climate changes in air temperature, precipitation, and wind speed in the region of the western part of the Russian Arctic (60°–75° N, 30°–85° E) over 1980–2021. The transition between 2000 and 2001 was chosen as the time boundary between the periods, based on the application of the model of stepwise transitions from one quasi-stationary regime to another. Using this method, 2001 was found to be the smallest step year in the western Russian Arctic region. Significant changes in the parameters studied between the periods 1980–2000 and 2001–2021 are shown. Moreover, the strongest increase in temperature was observed for the months of November and April, which indicates a shift in the boundaries of the seasons — a later start and an early end of winter. It was found that in the period 2001–2021 the temperature increased most rapidly in the water areas of the Barents and Kara seas, and this growth occurred with acceleration. Negative temperature changes were found in the winter season in the areas where large rivers flow into the Barents and Kara Seas. It is hypothesized that this is due to the detected increase in the amount of precipitation in the catchment area of these rivers in 2001–2021 compared to 1980–2000. It is shown that the detected increase in the amount of precipitation is associated with a significant change in the atmospheric circulation in the region under study. In the summer season and September the western wind intensified in the region under study. During the winter season 2001–2021 in the Barents and Kara Seas the south wind increased compared to 1980–2000. Thus, significant changes in the climate of the western part of the Russian Arctic occurred during the time period considered. Westerly transport from the North Atlantic has intensified, precipitation has increased, and there has been an accelerated rise in temperature. All this contributed to the “atlantification” of the climate of the western part of the Russian Arctic.

Keywords: Arctic amplification, Arctic atlantification, atmospheric circulation, Barents Sea, climate warming, climate shift, feedbacks, hydrometeorological parameters, Kara Sea, Northwest Russia, White Sea.

For Citation: *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. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (3): 258–277. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277>.

Received 11.07.2022**Revised 13.09.2022****Accepted 15.09.2022****ВВЕДЕНИЕ**

Потепление климата Арктики подтверждается изменениями основных гидрометеорологических величин атмосферы и океана за многолетний период времени, и наиболее ярко оно проявляется в последние десятилетия. Свидетельства этого процесса в высоких широтах — повышение температуры приповерхностного слоя атмосферы, сокращение площади морского льда и уменьшение его толщины, повышение температуры поверхностного слоя воды в морях, таяние многолетней мерзлоты, увеличение доли жидких осадков в течение года [1, 2]. По данным [3],

отмечается повышение водного стока почти всех рек Европейской части России, и этот тренд существует в основном за счет увеличения расходов воды со второй половины 1980-х гг. На реках Кольского полуострова и Карелии отмечено увеличение водности весной в последние десятилетия по отношению к среднему весеннему стоку за период 1956–1980 гг., максимальное увеличение стока (33–76 %) почти на всех незарегулированных реках водосбора Белого моря отмечается в апреле [4]. Зимний период почти на всех реках, впадающих в Белое море, также характеризуется увеличением водности. В реках бассейна Белого моря отмечается рост водного стока с 1960 до 2007 г., после чего наметилась тенденция к понижению, сохранившаяся до 2015 г., затем в 2016–2018 гг. с водосборной площади Белого моря отмечался сток, близкий к норме [5].

Температура в Арктике повышается быстрее, чем в среднем по планете [1]. Например, на фоне общего повышения температуры воздуха для Российской Федерации наибольшая скорость среднегодового роста температуры отмечается на побережье Северного Ледовитого океана. С середины 1990-х гг. по 2020 г. температура в так называемой морской Арктике повысилась зимой более чем на 4 °C, а летом — почти на 2,5 °C [2]. Наблюдаемое арктическое усиление потепления климата вызвано положительными обратными связями, характерными для этого региона [6].

В осадках также выражена тенденция к увеличению. Например, в многолетнем плане для северной полярной области за период 1936–2021 гг. наблюдается тенденция статистически значимого увеличения сумм осадков со средней скоростью около 3,17 мм/10 лет в холодном сезоне [2]. По данным того же доклада [2], характеристики ветра в многолетнем плане изменились слабо, однако наибольшие положительные аномалии для России, например, в 2021 г. были выражены зимой вдоль побережья Северного Ледовитого океана, а летом над Баренцевым морем (около 3 м/с). Таким образом, к происходящему росту температуры, сокращению морского льда и увеличению осадков можно применить термин «атлантификация» Арктики, который изначально был введен для обозначения изменений физических свойств верхнего слоя воды приатлантической части Северного Ледовитого океана [7, 8].

Потепление сказывается на функционировании наземных и морских экосистем, изменении ареалов животных и жизни коренного населения северных районов, выражается в перестройке подходов и логистики при экономическом освоении территорий. В разных секторах этого обширного региона наблюдаются региональные проявления изменений климата, поэтому необходимо рассматривать различные сценарии потепления, выявлять проблемные области, чтобы быть готовым к возможным рискам, связанным с освоением ресурсов Арктики.

Таким образом, цель работы: определить климатические изменения температуры воздуха, количества осадков и скорости ветра в регионе западной части Российской Арктики (60–75° с. ш., 30–85° в. д.) за период 1980–2021 гг.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Использовались среднесуточные данные температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности, общего количества осадков за сутки и скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности из реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 на сетке 0,5° ш. × 0,625° д. за период 1980–2021 гг. [9].

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 — GMAO) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration — NASA). MERRA-2 представляет собой атмосферный реанализ современной эры спутниковых наблюдений, начинающейся с 1980 г. [9]. Он заменяет исходный реанализ MERRA [10] и использует обновленную версию системы усвоения данных Goddard Earth Observing System Model Version 5 (GEOS-5). MERRA-2 включает обновления модели GEOS [11] и схемы глобальной статистической интерполяции (Global Statistical Interpolation — GSI) [12].

MERRA-2 создан для замены исходного реанализа MERRA благодаря достижениям в системе усвоения данных, которая может использовать новые микроволновые наблюдения, инструменты гиперспектрального инфракрасного излучения и информацию об аэрозолях. MERRA-2 также использует наблюдения НАСА за профилем озона, которые были начаты в конце 2004 г. Дополнительно MERRA-2 использует данные об осадках, основанные на наблюдениях, в качестве форсинга для параметризации граничных условий на земной поверхности [13].

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. Используемые вертикальные уровни не менялись: переменные предоставляются либо на исходной вертикальной сетке (на 72 слоях модели), либо интерполируются на 42 стандартных уровня давления. В настоящей работе анализировались выходные данные MERRA-2 температуры на высоте 2 метра от поверхности, которые предназначены для сравнения с данными метеорологических станций.

Дополнительно для проверки полученных результатов использовались среднемесячные данные температуры воздуха и скорости ветра на уровне сигма 0,995 из NCEP/NCAR Reanalysis на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$ за период 1980–2021 гг. [14]. Уровень сигма 0,995 является самым близким к поверхности уровнем модели, использующейся при усвоении данных в NCEP/NCAR Reanalysis, и приблизительно соответствует высоте 42,2 метра над поверхностью рельефа местности в каждом узле сетки. Также использовались среднемесячные данные количества осадков за 1980–2021 гг. из реанализа NOAA's PRECipitation REConstruction over Land (PREC/L), представленные только над сушей на сетке $1 \times 1^\circ$ [15]. Результаты этих реанализов получены на основе усвоения данных наблюдений на метеостанциях, и сравнение с ними позволяет оценить, как адекватно и достоверно воспроизводит реанализ NASA MERRA-2 данные наземных наблюдений. При этом следует обратить внимание на то, что у большинства реанализов есть проблемы с воспроизведением данных наблюдений на метеостанциях в горных районах и в районах на границе суша — море.

По всем исследуемым среднемесячным данным в каждом узле их сетки рассчитан средний годовой ход за период 1980–2021 гг. Затем этот средний годовой ход в каждом узле сетки вычтен из данных для получения среднемесячных аномалий относительно среднего годового хода (далее — просто аномалии).

По исследуемым данным для региона западной части Российской Арктики ($60\text{--}75^\circ$ с. ш., $30\text{--}85^\circ$ в. д.) рассчитаны и построены следующие поля:

1. Средние значения за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг.

2. Средние изменения между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами).

3. Средние значения для зимних (декабрь–февраль) и летних (июнь–август) сезонов и 12 месяцев года за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг.

4. Средние изменения для зимних (декабрь–февраль) и летних (июнь–август) сезонов и 12 месяцев года между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами).

5. Скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий относительно годового хода за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг., оцененная с помощью приближения полиномами 1-й степени методом наименьших квадратов (1-я производная).

6. Ускорение (квадратичный тренд) изменений среднемесячных аномалий относительно годового хода за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг., оцененное с помощью приближения полиномами 2-й степени — методом наименьших квадратов (2-я производная).

Исследовались среднемесячные значения зональной (направленной с запада на восток) и меридиональной (направленной с юга на север) компонент скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности. Производилось отдельное осреднение зональной (U) и меридиональной (V) компонент скорости ветра за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. После чего по полученным средним значениям U и V вычислялись модуль и направление скорости ветра. Аналогичным образом вычислялись средние значения модуля и направления скорости ветра для каждого месяца года, а также зимнего и летнего сезонов. Следует отметить, что использованные среднемесячные значения U и V скорости ветра из-за осреднения существенно отличаются по величине от среднесуточных. Вследствие чего полученные результаты следует интерпретировать как оценку климатических (долгопериодных) изменений циркуляции атмосферы исследуемого региона.

В качестве временной границы между периодами выбран переход между 2000 и 2001 гг. Этот выбор сделан по нескольким причинам. Во-первых, таким образом, рассматриваются равные по продолжительности — 21 год — периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. Соответственно, при выполняемом осреднении за эти периоды участвует одинаковое число лет. Во-вторых, выбор этих периодов сделан на основе применения модели ступенчатых переходов от одного квазистационарного режима к другому [16]. При данном подходе год ступенчатого перехода от одного квазистационарного периода к другому находится итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда [17]. Применяя этот метод, 2001 г. был найден наименьшим годом ступенчатого перехода температуры в регионе западной части Российской Арктики, произошедшего на западе Кольского полуострова (рис. 1). При этом из рассмотрения исключены небольшие районы в регионе Обской губы, отмеченные на рис. 1 синим цветом, речь о которых пойдет в следующем разделе.

Поле лет ступенчатых переходов температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности (ТВП) по данным MERRA-2 за период 1980–2021 гг. (рис. 1) было построено следующим образом. В каждом узле сетки MERRA-2 вычислялся ряд среднегодовых значений ТВП. Эти ряды сглаживались скользящим пятилетним средним. Каждый из рядов 22 раза разбивался на две части, начиная от 1990 г. и заканчивая 2011 г. То есть крайние 10 лет с каждого конца ряда не рассматривались в качестве возможного года ступенчатого перехода. Для каждого из таких

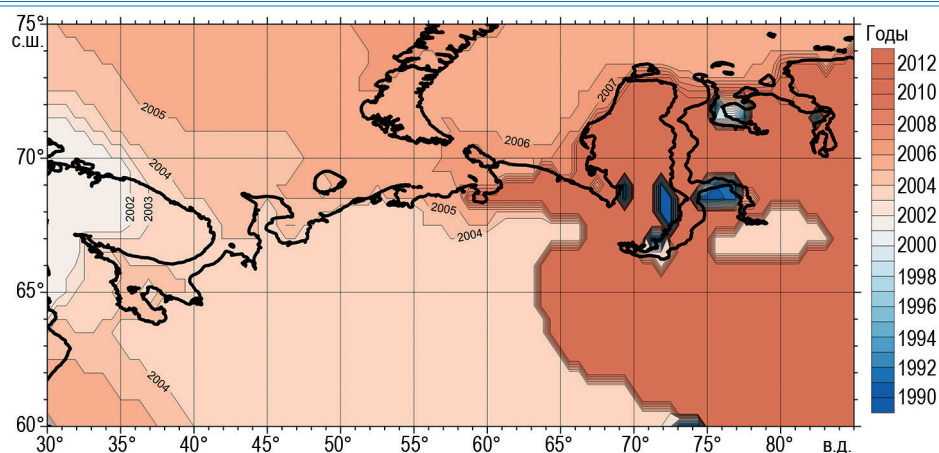


Рис. 1. Поле лет ступенчатых переходов температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности за период 1980–2021 гг.

Fig. 1. The field of years of stepwise transitions of air temperature at a height of 2 meters from the surface for the period 1980–2021

разбиений вычислялись дисперсии первой и второй части и сумма этих дисперсий. Таким образом, строился ряд из 22 значений сумм дисперсий, и затем находился минимум этого ряда сумм дисперсий. Год, которому соответствовал этот минимум, и принимался за год ступенчатого перехода данного узла сетки. Более подробное и формализованное описание этого метода можно найти в [16, 17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На поле лет ступенчатых переходов ТВП (рис. 1) видно их увеличение с запада на восток. Так, в регионе западной части Кольского полуострова минимальным годом ступенчатого перехода является 2001 г. (отмечен самым бледно-розовым цветом). А на востоке рассматриваемого региона западной части Российской Арктики годом ступенчатого перехода ТВП является 2011 г. Это свидетельствует о существенной роли влияния западного переноса из Северной Атлантики на процесс ступенчатого перехода климата исследуемого региона. В работах [18, 19] обнаружен переход климата Северной Атлантики на рубеже XX и XXI вв. из одной фазы в другую. Вероятнее всего, этот фазовый переход в Северной Атлантике с некоторой задержкой оказал влияние и на климат западной части Российской Арктики.

В северной части Тихого океана в 1998–1999 гг. произошел сдвиг климатического режима, который обнаруживается с помощью последовательного алгоритма проверки климатических сдвигов [20]. Более того, в работе [21] была выдвинута гипотеза о том, что и глобальная температурная динамика выглядит как ступенчатая функция. Несмотря на то, что эта позиция продолжает оставаться предметом научных дискуссий, данный подход ступенчатого изменения климата, на наш взгляд, представляет существенный интерес. И поэтому в данной работе изменения основных гидрометеорологических параметров западной части Российской Арктики рассматриваются с точки зрения перехода из одного климатического режима в 1980–2000 гг. в новое состояние 2001–2021 гг. Для оценки же изменений, произошедших внутри самих периодов 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг., построены поля скорости и ускорения этих изменений.

Данное исследование изменений климата западной части Российской Арктики было начато с рассмотрения температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности. Данные ТВП более равномерно распределены, чем температура самой поверхности, и лучше, на наш взгляд, подходят для построения полей изменений, произошедших за исследуемый период. В полях температуры поверхности граница между водой и сушей проявляется более заметно, чем в полях ТВП. Но при этом значения ТВП довольно близки к значениям температуры поверхности океана и суши. Поэтому, чтобы оценить температурные изменения всего исследуемого региона в целом, первоначально рассмотрены именно поля ТВП.

В 2001–2021 гг. средние значения ТВП существенно изменились по сравнению с 1980–2000 гг. (рис. П1). Нулевая изотерма сместилась на северо-восток, и средняя годовая температура перешла через ноль в достаточно больших по площади районах, что может послужить причиной таяния в них многолетней мерзлоты. Однако, помимо ТВП, для процессов образования и таяния многолетней мерзлоты важны и другие параметры, одним из которых является толщина снежного покрова, который выступает в качестве теплоизолятора между почвой и атмосферой.

Поля средних значений ТВП (рис. П1) демонстрируют существенное увеличение температуры в регионах Баренцева [22], Карского и Белого [23] морей в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. Этот рост ТВП мог явиться следствием обратной положительной связи между повышением температуры и сокращением морского льда [24, 25]. Открытая водная поверхность имеет гораздо более низкое альбедо, чем морской лед. Таким образом, при сокращении морского льда океан начинает поглощать больше солнечной радиации, и температура верхнего слоя воды увеличивается. Это в свою очередь приводит к ускорению таяния морского льда, в особенности на границе между льдом и открытой поверхностью воды. Более того, данный процесс может происходить не синхронно, а с задержкой из-за высокого теплосодержания воды. Так, тепло, накопленное океаном летом, может повлиять на температуру воздуха в последующий осенне-зимний сезон.

В регионе западной части Российской Арктики наблюдается сильный годовой ход ТВП. Поэтому представляется важным рассмотреть произошедшие климатические изменения отдельно для зимнего и летнего сезонов, а также для каждого из 12 месяцев года. Этот проведенный анализ показал, что между 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. в зимний сезон (декабрь–февраль) произошли более заметные изменения ТВП по сравнению с летним сезоном (июнь–август) (рис. П2). На полях, представленных на рис. П2, также видно, что ТВП заметнее всего выросла над акваториями Карского, Баренцева и Белого морей и в прилегающих к ним районах суши. Причем существенный рост ТВП над акваториями Карского и Белого морей наблюдался как в зимний, так и в летний сезон. Следует отметить, что на юго-востоке исследуемого региона средняя ТВП в 2001–2021 гг. существенно не увеличилась по сравнению с 1980–2000 гг., а в зимний сезон даже понизилась. Таким образом, уменьшилась разница температуры между югом и севером западной части Российской Арктики.

В летний сезон 2001–2021 гг. ТВП выросла в регионе Обской губы по сравнению с 1980–2000 гг. Но в отличие от летнего сезона, в зимний сезон наблюдаются отрицательные изменения ТВП в районах впадения крупных рек в Карское и Баренцево моря. Эти локальные понижения ТВП, на наш взгляд, могут быть связаны с уменьшением солености верхнего слоя воды в этих акваториях. И как следствие,

более раннего образования морского льда. Подтверждением этой гипотезы являются приведенные ниже результаты изменения количества осадков в водосборах этих рек.

Наиболее заметный рост ТВП в 2001–2021 гг. по отношению к 1980–2000 гг. наблюдается в двух месяцах года: ноябре и апреле (рис. П3). Вследствие чего можно сделать вывод, что в 2001–2021 гг. произошло сокращение продолжительности холодного сезона по сравнению с 1980–2000 гг.: зима стала начинаться позднее, а заканчиваться раньше. Причем наиболее существенные положительные изменения ТВП (более 4 °C) наблюдались в ноябре в Карском море (рис. П3а), что может быть связано с более поздним образованием морского льда в юго-западной части Карского моря в октябре–ноябре в период 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. В районах же Обской губы, Гыданской губы и Енисейского залива в ноябре произошло понижение средней ТВП, что, как уже было упомянуто выше, может быть вызвано увеличением пресной воды, поступающей в эти акватории.

В апреле наиболее сильные положительные изменения ТВП (более 2 °C) наблюдаются в северо-восточной части Баренцева моря. Этот рост ТВП может быть связан с более ранним таянием морского льда в этом регионе в период 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. На суше существенный рост ТВП в ноябре наблюдается в юго-западной части исследуемого региона, а в апреле — в его северо-восточной части.

Указанные выше изменения средних ТВП между 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. также наблюдаются в значениях средней скорости (линейного тренда) изменений среднемесячных аномалий ТВП (°C за 10 лет) за период 2001–2021 гг. (рис. П4б). На этом поле видно, что в период 2001–2021 гг. на востоке Баренцева моря и юго-западе Карского моря ТВП росла со скоростью более 1 °C за 10 лет, то есть за период 2001–2021 гг. она выросла более чем на 2 °C. В период же 1980–2000 гг. в акваториях исследуемых морей существенный рост ТВП не наблюдался (рис. П4а), но присутствовал заметный рост ТВП на западе исследуемого региона. Это подтверждает западно-восточное распространение лет ступенчатых переходов ТВП западной части Российской Арктики (рис. 1). Рис. П4а демонстрирует, что ТВП начала расти в период 1980–2000 гг. сначала на западе исследуемого региона, а в 2001–2021 гг. этот рост распространился на восток и усилился над акваториями Белого, Баренцева и Карского морей.

Особый интерес, на наш взгляд, представляет то, что указанный выше рост ТВП над акваториями Баренцева, Карского и Белого морей в 2001–2021 гг. происходил с положительным ускорением (рис. П5б). То есть скорость этого роста увеличивалась на протяжении периода 2001–2021 гг. Значения среднего ускорения (квадратичного тренда) изменений среднемесячных аномалий ТВП (°C за (10 лет)²), оцененное с помощью приближения полиномами 2-й степени (2-я производная), за период 1980–2000 гг. на востоке Баренцева моря и юго-западе Карского моря также являются положительными (рис. П5а) при линейном тренде, близком к нейтральному (рис. П4а). Это означает, что ветви парабол, которыми аппроксимированы изменения ТВП в этих регионах за 1980–2000 гг., направлены вверх, то есть рост ТВП начался в акваториях исследуемых морей раньше, чем в 2001 г. Но поскольку океан обладает большей инерционностью, чем атмосфера, то скорость роста ТВП над акваториями Баренцева, Карского и Белого морей в 1980–2000 гг., оцененная с помощью линейного тренда (рис. П4а), еще не превосходила скорость роста ТВП над западной материковой частью исследуемого региона. В период же 2001–2021 гг. и скорость, и ускорение роста ТВП над акваториями Баренцева, Карского и Белого

морей стали заметно превосходить эти показатели над сушей. И возможно, одной из причин этого опережающего роста послужила упомянутая выше альбедная положительная обратная связь между морским льдом и температурой верхнего деятельного слоя океана.

На фоне указанного выше роста ТВП в западной части Российской Арктики в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. выделяются локальные районы понижения ТВП в акватории заливов, в которые впадают реки Обь, Гыда, Енисей, Байдарата, Море-Ю, Печора, Ви́жас и Мезень, в зимний сезон (рис. П2а). В ноябре отрицательные изменения ТВП наблюдаются только в Обской губе, Гыданской губе и Енисейском заливе (рис. П3а). Причем в летний сезон (рис. П2б) и в апреле (рис. П3б) отрицательных изменений ТВП в указанных районах не наблюдается. На поле лет ступенчатых переходов (рис. 1) в районах Обской, Байдарацкой и Гыданской губы наблюдаются значения, отличающиеся от окружающих их территорий и акваторий. Это же справедливо и для полей скорости (рис. П4б) и ускорения (рис. П5б) изменений ТВП в 2001–2021 гг. Таким образом, можно предположить, что данные отличия наблюдаются по причине наличия некоторых иных факторов, влияющих на эти локальные районы и не влияющих на окружающие их области. Одно из объяснений этих аномалий заключается в том, что эти локальные отрицательные изменения ТВП произошли по причине увеличения общего количества осадков (ОКО) в водосборах указанных рек в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. в сентябре (рис. П6).

Поскольку увеличение ОКО в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. особенно характерно для сентября (рис. П6), то оно привело к увеличению количества пресной воды, переносимой в первой половине осени в районы обнаруженных отрицательных аномалий ТВП. Вследствие чего в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. в районах впадения крупных рек в Баренцево и Карское моря происходило распреснение верхнего слоя морской воды. Это способствовало усилению стратификации верхнего слоя воды и более раннему образованию морского льда, что послужило причиной сокращения потоков тепла из океана в атмосферу и понижения ТВП в этих локальных районах. Более того, существенный рост ОКО в 2001–2021 гг. характерен для большей части материковой части исследуемого региона (рис. П7б), в то время как в 1980–2000 гг. такого заметного увеличения ОКО не наблюдалось (рис. П7а). Следует обратить внимание, что данные ОКО обладают сильной пространственной и временной изменчивостью, что проявляется на рис. П6 и что оказывает существенное влияние на результаты скорости изменений ОКО (рис. П7), оцененной с помощью метода наименьших квадратов, чувствительного к граничным значениям.

Обнаруженный рост ОКО в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. мог произойти вследствие изменения циркуляции атмосферы в западной части Российской Арктики. Зимняя и летняя циркуляции атмосферы в исследуемом регионе существенно различаются, поэтому эти сезоны следует рассмотреть отдельно. На рис. П8 представлены поля средних значений скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности (СВП) для зимнего сезона (декабрь–февраль) за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. На этих полях видно, что в зимний сезон 2001–2021 гг. в Баренцевом и Карском морях произошло усиление южного ветра по сравнению с 1980–2000 гг. (рис. П8). Это же подтверждается и полем средних изменений СВП между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для зимнего сезона (декабрь–февраль) (рис. П9а). На рис. П9а видно, что в Барен-

цевом море модуль скорости южного ветра в зимний период 2001–2021 гг. вырос по сравнению с 1980–2000 гг. более чем на 0,5 м/с. Увеличение меридиональной (направленной с юга на север) компоненты СВП в зимний сезон на юге Баренцева моря составило 0,5–1,0 м/с. Это могло привести к ветровому нагону морского льда с юга на север Баренцева и Карского морей, сокращению площади льда и усилению перемешивания верхнего слоя воды на юге этих морей.

В летний сезон (июнь–август) в регионе западной части Российской Арктики в 2001–2021 гг. произошло усиление западного ветра по сравнению с 1980–2000 гг., что способствовало усилению западного переноса тепла и влаги из Северной Атлантики в исследуемый регион (рис. П9б и рис. П10). Еще более заметное усиление западного ветра в исследуемом регионе произошло в сентябре (рис. П11). Увеличение зональной (направленной с запада на восток) компоненты СВП в летний сезон и в сентябре на юге Баренцева и Карского морей составило 0,5–1,0 м/с. Возможно, это и могло стать одной из причин описанного выше роста ОКО, выпадающих в летний период и сентябре, в западной части Российской Арктики в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг.

Найденные изменения циркуляции атмосферы в 2001–2021 гг. по отношению к 1980–2000 гг. способствовали ослаблению влияния Арктики на исследуемый регион и усилению влияния Северной Атлантики, что и могло послужить одной из причин обнаруженного роста ТВП западной части Российской Арктики.

Для проверки полученных по данным MERRA-2 результатов аналогичным образом были рассчитаны поля изменений исследуемых гидрометеорологических параметров, но уже по данным NCEP/NCAR Reanalysis и PREC/L. При построении проверочных полей применялись те же самые программы и использовались данные за те же самые временные интервалы, что и для полей, представленных на рис. 1 и П1–П11. Основная часть проверочных полей достаточно хорошо совпала с полученными по данным MERRA-2 результатами с учетом более грубого пространственного разрешения данных NCEP/NCAR Reanalysis и PREC/L по сравнению с данными MERRA-2. Исключение составили результаты скорости изменений ОКО, оцененные с помощью приближения полиномами 1-й степени с помощью метода наименьших квадратов и последующего взятия 1-й производной (рис. П7). Это свидетельствует о том, что к результатам, полученным с помощью метода наименьших квадратов, следует относиться с осторожностью из-за высокой чувствительности этого метода к краевым значениям. И это особенно заметно проявилось при анализе данных ОКО, обладающих высокой временной и пространственной изменчивостью. С другой стороны, результаты по изменению ОКО, полученные с помощью интегрирования по временным периодам 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг., подтвердились по проверочным данным, что говорит об устойчивости этого метода к краевым условиям и надежности полученных результатов.

ВЫВОДЫ

1. Подтверждено существенное потепление климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Причем наиболее сильное увеличение температуры отмечается для ноября и апреля, что свидетельствует о произошедшем смещении границ сезонов — более позднем начале зимы и раннем ее завершении. Обнаружено, что в период 2001–2021 гг. температура быстрее всего росла в акваториях Баренцева, Карского и Белого морей и этот рост происходил с ускорением. Таким образом, уменьшилась разница температуры между югом и севером западной части Российской Арктики. Предположено,

что одной из причин этого ускоренного роста температуры могла послужить альбедная обратная положительная связь с площадью морского льда.

2. Выявлено увеличение количества осадков, особенно явно проявляющееся для летнего сезона и сентября. Вызванное этим увеличение поступления пресных вод в моря способствовало распреснению и усилению стратификации верхнего слоя воды, более раннему образованию морского льда, сокращению потоков тепла из океана в атмосферу и понижению приповерхностной температуры воздуха в зимние периоды в локальных районах впадения крупных рек в Карское и Баренцево моря.

3. Обнаружено значительное изменение циркуляции атмосферы в исследуемом регионе. В зимний сезон 2001–2021 гг. в Баренцевом и Карском морях произошло усиление южного ветра по сравнению с 1980–2000 гг. Это могло привести к ветровому нагону морского льда с юга на север Баренцева и Карского морей, сокращению площади льда и усилению перемешивания верхнего слоя воды на юге этих морей. В летний сезон и сентябре 2001–2021 гг. произошло усиление западного ветра по сравнению с 1980–2000 гг., что способствовало усилению западного переноса тепла и влаги из Северной Атлантики в исследуемый регион.

4. Таким образом, за рассмотренный временной период произошли существенные изменения климата западной части Российской Арктики. Усилился западный перенос из Северной Атлантики, возросло количество выпадающих атмосферных осадков, и произошел ускоренный рост температуры. Все это способствовало «атлантификации» климата западной части Российской Арктики и приближению его к переломной точке, после которой климатическая система может установиться вокруг другого состояния равновесия. Но для подтверждения или опровержения предположений о причинах и последствиях установленных изменений требуются дополнительные исследования, которые мы намерены выполнить в дальнейшем.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено 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.).

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project № 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moon T.A., Druckenmiller M.L., Thoman R.L. Executive Summary // NOAA Technical Report OAR ARC ; 21-01. Arctic Report Card 2021. 4 p. <https://doi.org/10.25923/5s0f-5163>. URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/34308> (дата обращения: 15.06.2022).
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.: Росгидромет, 2022. 104 с.
3. Магрицкий Д.В., Повалишинкова Е.С., Фролова Н.Л. История изучения стока воды и водного режима рек Арктической зоны России в XX в. и начале XXI в. // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 61–96. doi: 10.7256/2453-8922.2019.3.29939. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29939 (дата обращения: 15.06.2022).

4. Комплексные исследования Белого моря и водосбора в интересах развития Арктической зоны РФ: Отчет о научно-исследовательской работе. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 103 с.
5. Толстиков А.В., Балаганский А.Ф., Чернов И.А. Оценка теплового стока рек водосбора Белого моря // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2021. № 3. С. 109–119.
6. Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I., Sandø A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A. Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: a suggested positive feedback // Journal of Physical Oceanography. 2016. № 46 (5). P. 1437–1456.
7. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat // Journal of Climate. 2012. № 25 (13). P. 4736–4743.
8. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. 2017. № 356.6335. P. 285–291.
9. 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). P. 5419–5454.
10. 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). P. 3624–3648.
11. 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. 2014. № 7. P. 7575–7617.
12. Wu W.-S., Purser R.J., Parrish D.F. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances // Mon. Wea. Rev. 2002. № 130. P. 2905–2916.
13. Reichle R.H., Koster R.D., De Lannoy G.J.M., Forman B.A., Liu Q., Mahanama S.P.P., Toure A. Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates // Journal of Climate. 2011. № 24. P. 6322–6338.
14. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Roy J., Dennis J. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
15. Chen M., Xie P., Janowiak J.E., Arkin P.A. Global land precipitation: a 50-yr monthly analysis based on Gauge observations // J. of Hydrometeorology. 2002. № 3. P. 249–266.
16. Лобанов В.А., Токпа М.М., Григорьева А.А. Применение статистических моделей нестационарного среднего для выявления изменений климата // Климатические риски и космическая погода: Материалы Международной конференции, посвященной памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 14–17 июня 2021 г. Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. С. 360–369.
17. Лобанов В.А., Горшкова Н.И. Характеристики ледового режима республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки РГГМУ. 2020. № 55. С. 86–98.
18. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. Phase variability of some characteristics of the present-day climate in the Northern Atlantic region // Doklady Earth Sciences. 2011. V. 438. № 2. P. 887–892.
19. Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. 2017. V. 174. № 7. P. 2863–2878.

20. Rodionov S.N. A sequential algorithm for testing climate regime shifts // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31 (9). L09204, 4 p. doi:10.1029/2004GL019448.
21. Барцев С.И., Белолипецкий П.В., Дегерменджи А.Г., Иванова Ю.Д., Почекотов А.А., Салтыков М.Ю. Новый взгляд на динамику климата Земли // *Вестник РАН*. 2016. Т. 86. № 3. С. 244–251.
22. Serykh I.V., Kostianoy A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature // *Ecologica Montenegrina*. 2019. V. 25. P. 1–13.
23. Серых И.В., Толстиков А.В. О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем // *Вестник Московского университета. Сер. 5: География*. 2020. № 4. С. 83–95.
24. Будыко М.И. О происхождении ледниковых эпох // *Метеорология и гидрология*. 1968. № 11. С. 3–12.
25. Серых И.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Костяная Е.А. О переходе температурного режима региона Белого моря в новое фазовое состояние // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15. № 1. С. 98–111.

REFERENCES

1. Moon T.A., Druckenmiller M.L., Thoman R.L. Executive Summary. NOAA Technical Report OAR ARC ; 21-01. Arctic Report Card 2021. 4 p. <https://doi.org/10.25923/5s0f-5163>. Available at: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/34308> (accessed 15.06.2022).
2. *Doklad ob osobennostiakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2021 god*. Report on climate features in the Russian Federation for 2021. Moscow: Rosgidromet, 2022: 104 p. [In Russian].
3. Magricki D.V., Povalishnikova E.S., Frolova N.L. The history of the study of water runoff and the water regime of rivers in the Arctic zone of Russia in the 20th century and the beginning of the XXI century. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2019, 3: 61–96. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29939. Available at: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29939 (accessed 15.06.2022). [In Russian].
4. *Kompleksnye issledovaniia Belogo moria i vodosbora v interesakh razvitiia Arkticheskoi zony RF: Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote*. Comprehensive studies of the White Sea and the watershed in the interests of the development of the Arctic zone of the Russian Federation. Research report. Petrozavodsk: KarNC RAS. 2021: 103 p. [In Russian].
5. Tolstikov A.V., Balaganskiy A.F., Chernov I.A. Estimation of heat runoff of the rivers in the White Sea catchment area. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya. Bulletin of Moscow University. Geography*. 2021, 3: 109–119. [In Russian].
6. Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I., Sandø A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A. Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: a suggested positive feedback. *Journal of Physical Oceanography*. 2016, 46 (5): 1437–1456.
7. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. *Journal of Climate*. 2012, 25 (13): 4736–4743.
8. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Science*. 2017, 356.6335: 285–291.
9. 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.

10. 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.
11. 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*. 2014, 7: 7575–7617.
12. Wu W.-S., Purser R.J., Parrish D.F. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. *Mon. Wea. Rev.* 2002, 130: 2905–2916.
13. Reichle R.H., Koster R.D., De Lannoy G.J.M., Forman B.A., Liu Q., Mahanama S.P.P., Toure A. Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates. *Journal of Climate*. 2011, 24: 6322–6338.
14. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Roy J., Dennis J. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1996, 77: 437–471.
15. Chen M., Xie P., Janowiak J.E., Arkin P.A. Global Land Precipitation: A 50-yr monthly analysis based on Gauge observations. *J. of Hydrometeorology*. 2002, 3: 249–266.
16. Lobanov V.A., Tokpa M.M., Grigor'eva A.A. *Primenenie statisticheskikh modelei nestatsionarnogo srednego dlia vyivleniia izmenenii klimata*. Application of statistical non-stationary mean models to detect climate change. *Klimaticheskie riski i kosmicheskaja pogoda: Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii, posviashchenoi pamiati Niny Konstantinovny Kononovoi. Irkutsk, 14–17 iyunia 2021 g.* Climate risks and space weather: Proceedings of the International Conference dedicated to the memory of Nina Kononova. Irkutsk, June 14–17, 2021. Irkutsk: IGU Publishing House, 2021: 360–369. [In Russian].
17. Lobanov V.A., Gorshkova N.I. Characteristics of the ice regime of the Republic of Sakha (Yakutia) and their climatic changes. *Ucheniye zapiski RGGMU*. Scientific notes of RSHU. 2020, 55: 86–98. [In Russian].
18. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. Phase variability of some characteristics of the present-day climate in the Northern Atlantic region. *Doklady Earth Sciences*. 2011, 438 (2): 887–892.
19. Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. *Pure and Applied Geophysics*. 2017, 174 (7): 2863–2878.
20. Rodionov S.N. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophys Res Lett*. 2004, 31 (9): L09204: 4 p. doi:10.1029/2004GL019448.
21. Barcev S.I., Belolipeckij P.V., Degermendzhi A.G., Ivanova Yu.D., Pochekutov A.A., Saltykov M.Yu. A new look at the dynamics of the earth's climate. *Vestnik RAN*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2016, 86 (3): 244–251. [In Russian].
22. Serykh I.V., Kostianoy A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature. *Ecologica Montenegrina*. 2019, 25: 1–13.
23. Serykh I.V., Tolstikov A.V. On the reasons for the long-term variability of the near-surface air temperature over the White Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*. Bulletin of Moscow University. Geography. 2020, 4: 83–95. [In Russian].
24. Budyko M.I. On the origin of glacial epochs. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1968, 11: 3–12. [In Russian].
25. 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'naia i prikladnaia gidrofizika*. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022, 15 (1): 98–111. [In Russian].

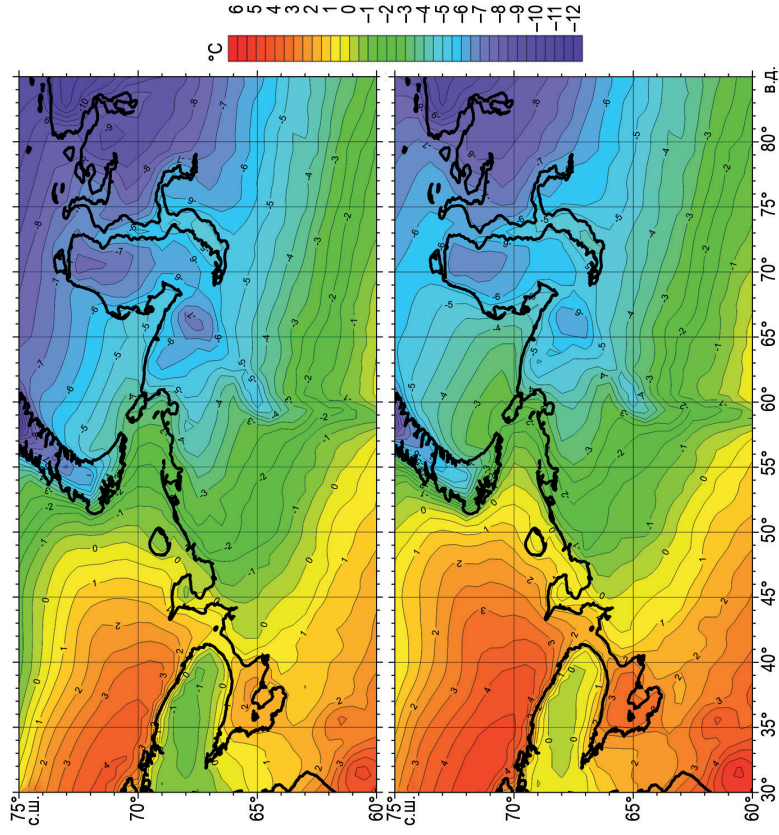


Рис. П1. Средние значения температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности за периоды 1980–2000 гг. (а) и 2001–2021 гг. (б)

Fig. A1. Average values of air temperature at a height of 2 meters from the surface for the periods 1980–2000 (a) and 2001–2021 (б)

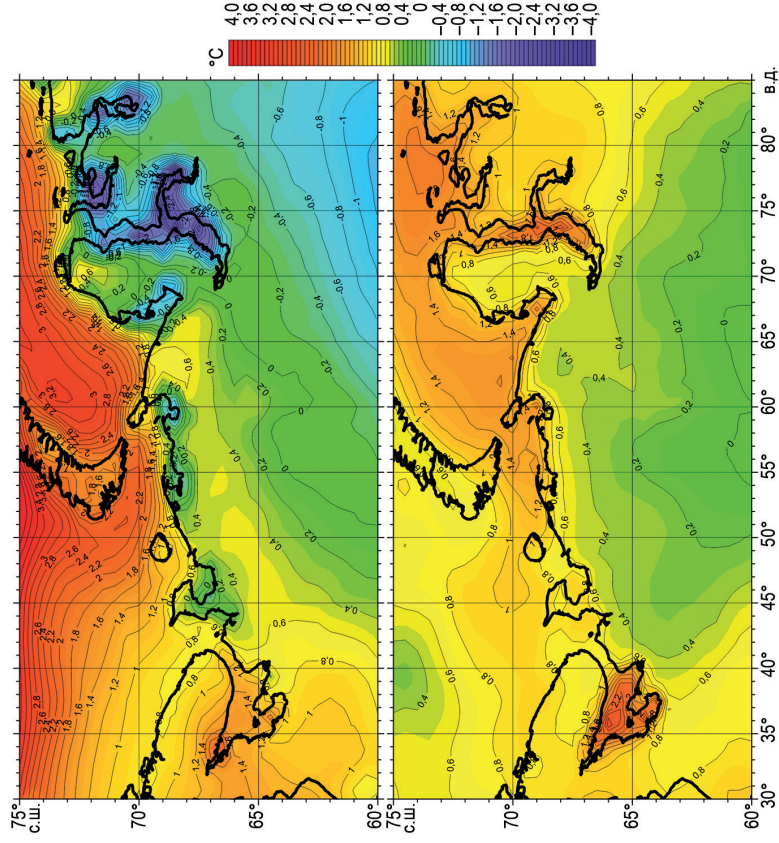


Рис. П2. Средние изменения температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для зимнего сезона (декабрь–февраль) (а) и для летнего сезона (июнь–август) (б)

Fig. A2. Average changes in air temperature at a height of 2 meters from the surface between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) for the winter season (December–February) (a) and for the summer season (June–August) (б)

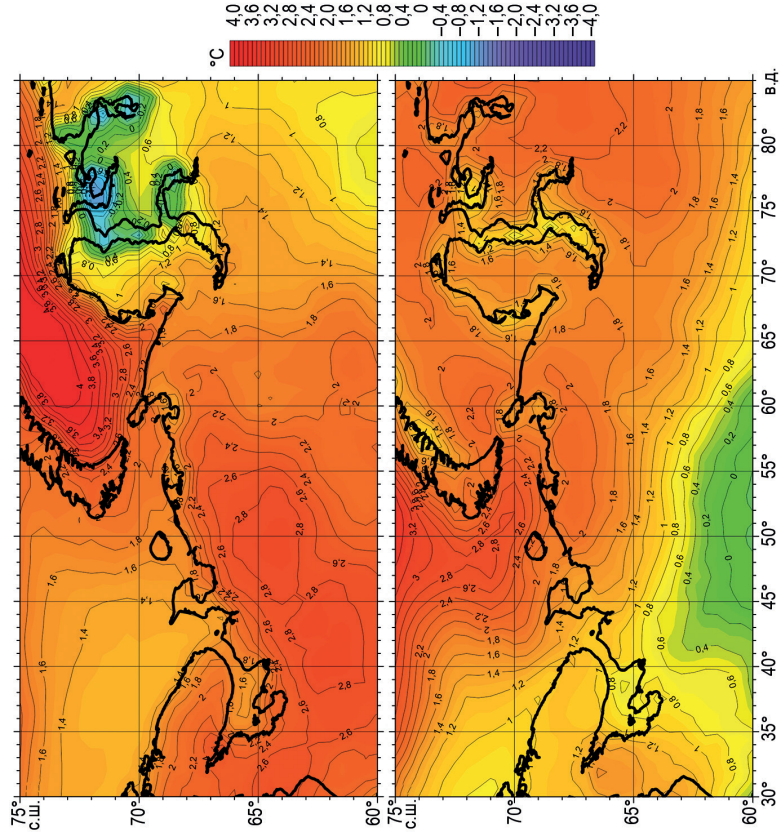


Рис. П3. Средние изменения температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для ноября (а) и апреля (б)

Fig. A3. Average changes in air temperature at a height of 2 meters from the surface between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) for the months of November (a) and April (b)

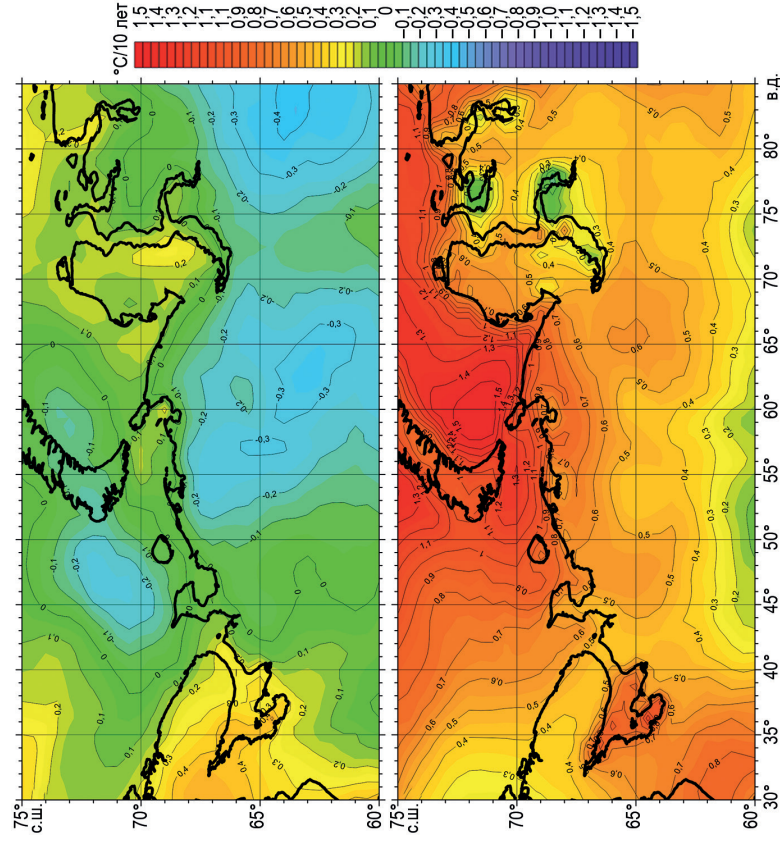


Рис. П4. Средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-й степени (1-я производная), за периоды 1980–2000 гг. (а) и 2001–2021 гг. (б)

Fig. A4. The average rate (linear trend) of changes in monthly average anomalies (relative to the annual variation) of air temperature at a height of 2 meters from the surface ($^{\circ}\text{C}$ for 10 years), estimated using the approximation by polynomials of the 1st degree (1st derivative), for periods 1980–2000 (a) and 2001–2021 (b)

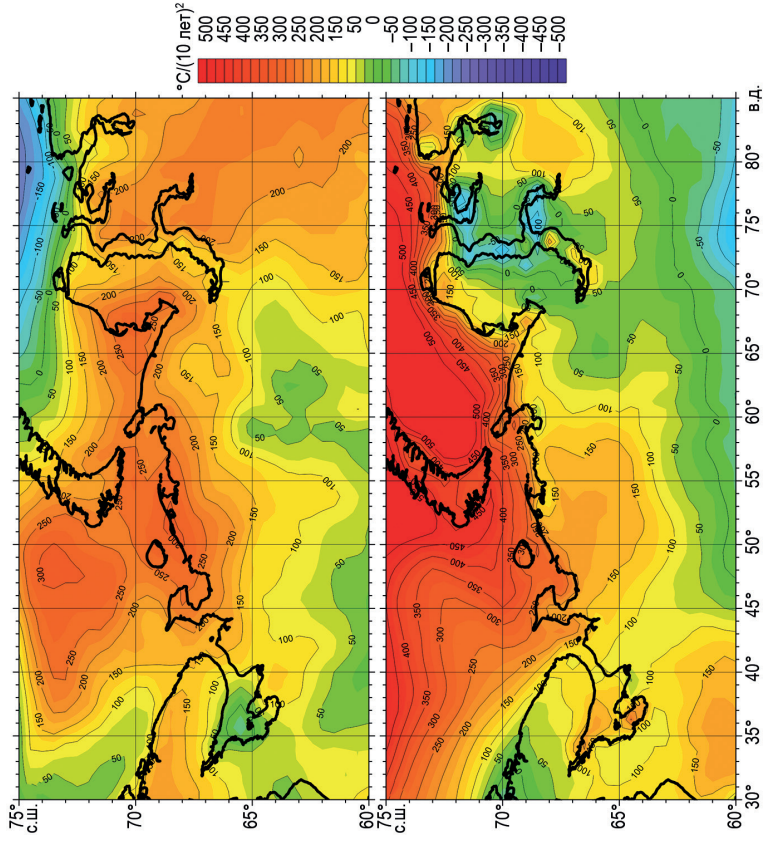


Рис. П5. Среднее ускорение (квадратичный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности ($^{\circ}\text{C}$ за $(10 \text{ лет})^2$), оцененное с помощью приближения полиномами 2-й степени (2-я производная), за периоды 1980–2000 гг. (а) и 2001–2021 гг. (б)

Fig. A5. Average acceleration (quadratic trend) of changes in monthly average anomalies (relative to the annual variation) of air temperature at a height of 2 meters from the surface ($^{\circ}\text{C}$ for $(10 \text{ years})^2$), estimated using the approximation by 2nd degree polynomials (2nd derivative), for the periods 1980–2000 (a) and 2001–2021 (b)

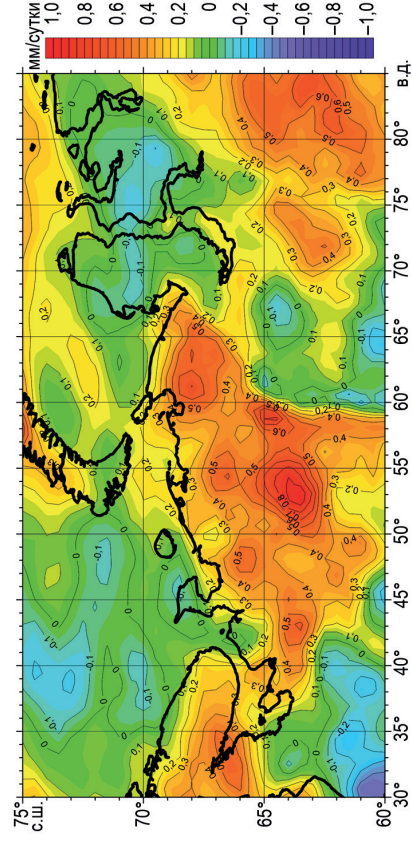


Рис. П6. Средние изменения общего количества осадков за сутки между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для сентября

Fig. A6. Average changes in total precipitation per day between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) for September

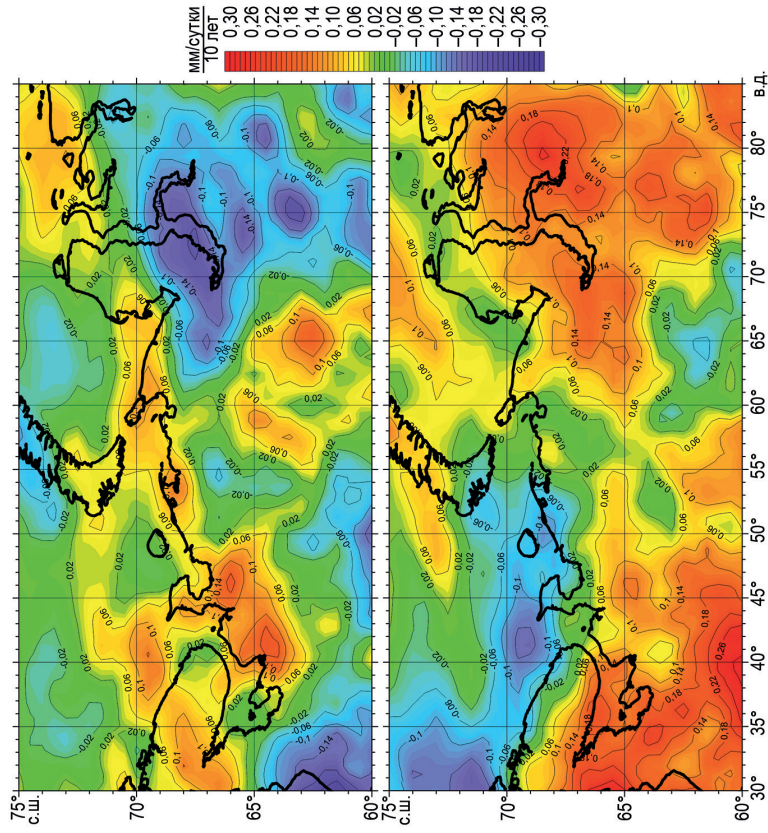


Рис. П7. Средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) общего количества осадков за сутки (мм/сутки за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-й степени (1-я производная), за периоды 1980–2000 гг. (а) и 2001–2021 гг. (б)

Fig. A7. The average rate (linear trend) of changes in monthly average anomalies (relative to the annual variation) of total precipitation per day (mm/day for 10 years), estimated using the approximation by polynomials of the 1st degree (1st derivative), for the periods 1980–2000 (a) and 2001–2021 (b)

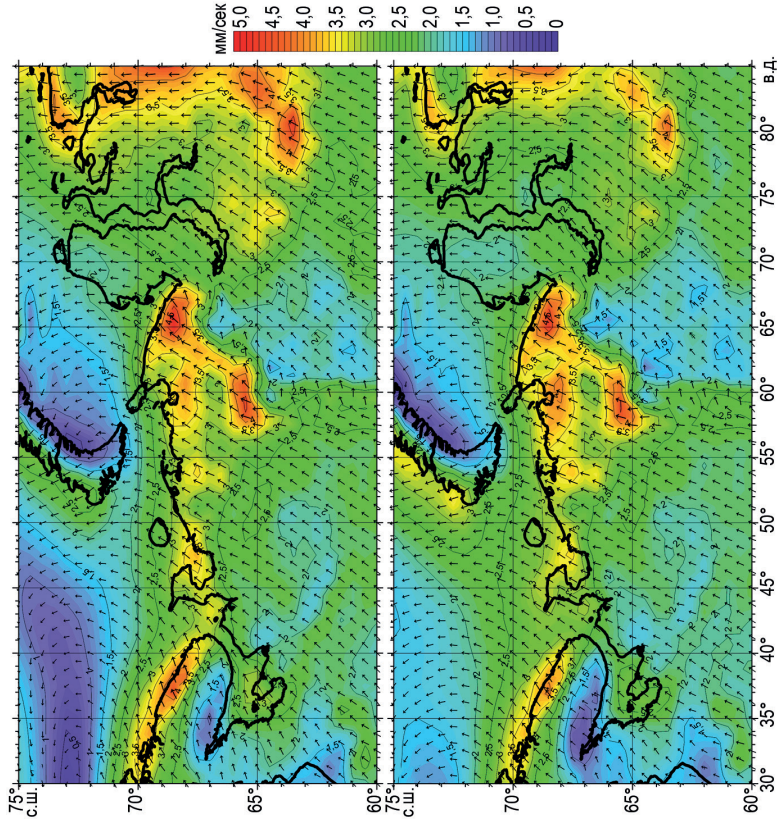


Рис. П8. Средние значения модуля и направления скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности для зимнего сезона (декабрь–февраль) за периоды 1980–2000 гг. (а) и 2001–2021 гг. (б)

Fig. A8. Average values of wind speed modules and directions at a height of 50 meters from the surface for the winter season (December–February) for the periods 1980–2000 (a) and 2001–2021 (b)

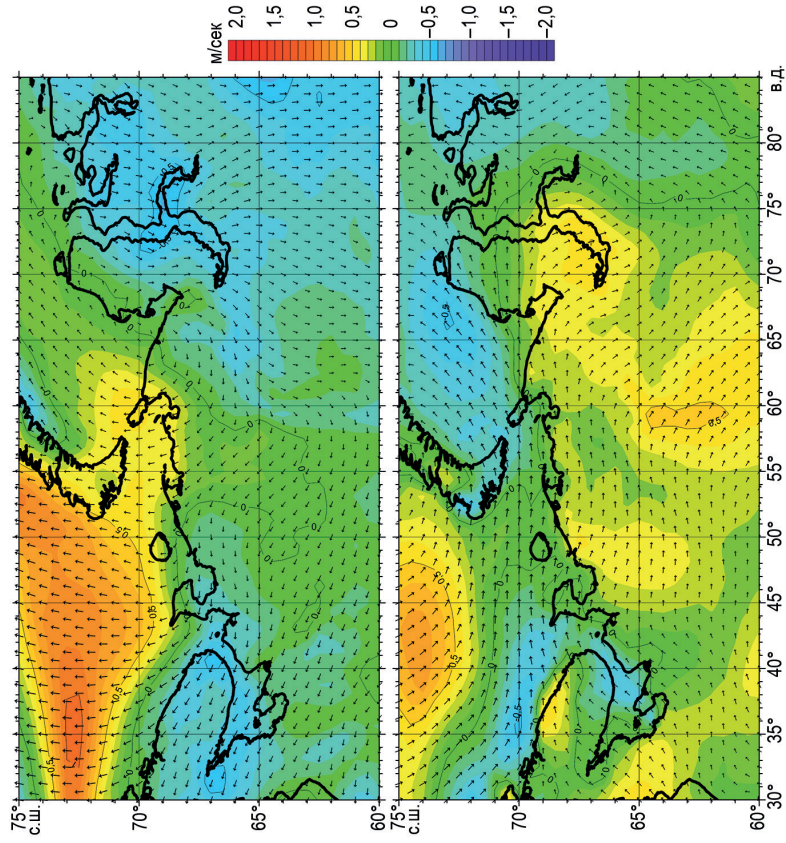


Рис. П9. Средние изменения модуля и направления скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для зимнего сезона (декабрь–февраль) (а) и летнего сезона (июнь–август) (б)

Fig. A9. Average changes in wind speed modules and directions at a height of 50 meters from the surface between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) for the winter season (December–February) (a) and the summer season (June–August) (b)

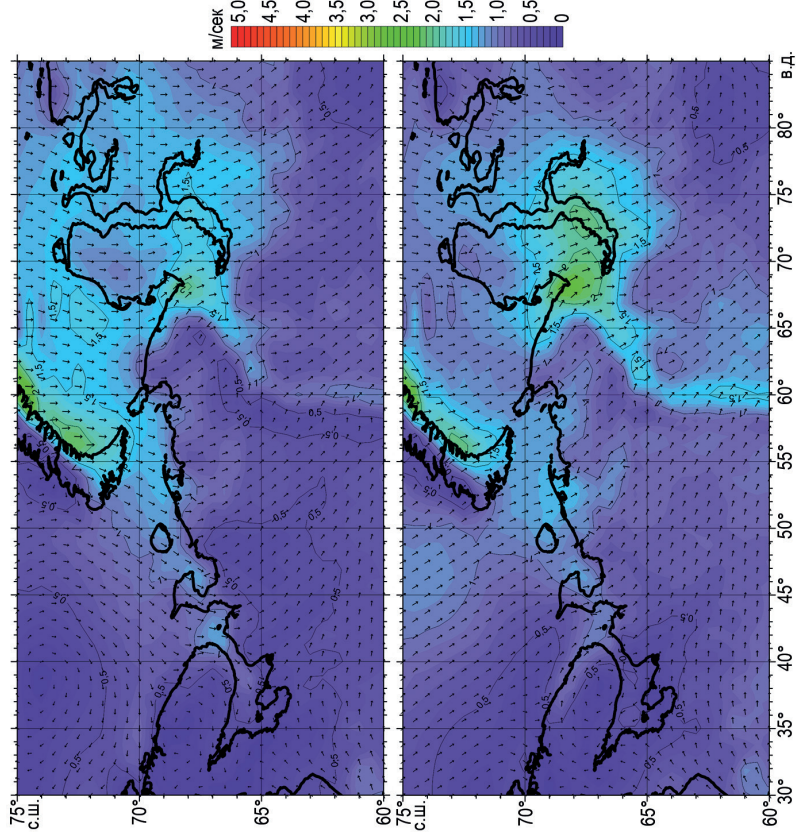


Рис. П10. Средние значения модуля и направления скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности для летнего сезона (июнь–август) за периоды 1980–2000 гг. (а) и 2001–2021 гг. (б)

Fig. A10. Average values of wind speed modules and directions at a height of 50 meters from the surface for the summer season (June–August) for the periods 1980–2000 (a) and 2001–2021 (b)

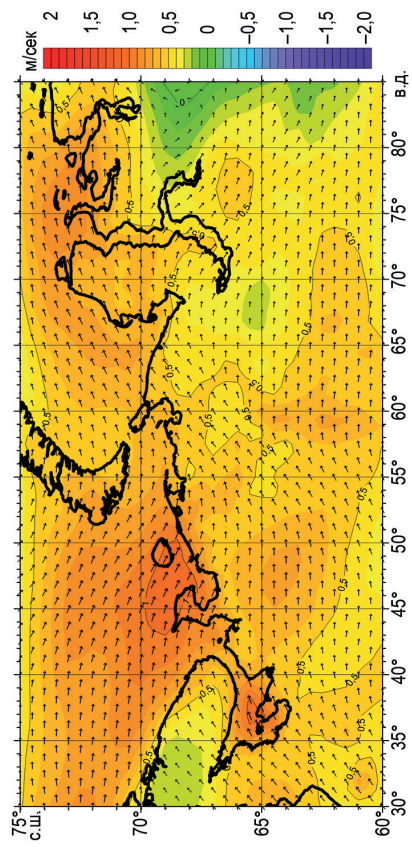


Рис. П11. Средние изменения модуля и направления скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для сентября

Fig. A11. Average changes in wind speed modules and directions at a height of 50 meters from the surface between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) for September