

УДК 551.583

© И. В. Серых^{1,2*}, А. Г. Костяной^{1,2,3}, С. А. Лебедев^{2,4,5}, Е. А. Костяная^{1,2}, 2022

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

²Геофизический центр РАН, 119296, ул. Молодежная, д. 3, г. Москва, Россия

³Московский Университет им. С.Ю. Витте, 115432, 2-й Кожуховский проезд, д. 12, стр. 1, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, Россия

⁵Майкопский государственный технологический университет, 385000, ул. Первомайская, д. 191, Республика Адыгея, г. Майкоп, Россия

*E-mail: iserykh@ocean.ru

О ПЕРЕХОДЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РЕГИОНА БЕЛОГО МОРЯ В НОВОЕ ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ

Статья поступила в редакцию 17.09.2021, после доработки 15.01.2022, принята в печать 18.01.2022

Аннотация

Исследованы изменения температуры воздуха у поверхности и завихренности поля скорости ветра акватории Белого моря и территории Мурманской и Архангельской областей и Республики Карелия. Анализировались среднемесячные данные реанализа NCEP/NCAR за период 1950–2020 гг. Оцененный с помощью линейного тренда средний рост температуры воздуха у поверхности составил +0,24 °C/10 лет. На фоне этого линейного роста наблюдаются существенные междекадные изменения температуры воздуха у поверхности. Выделены периоды: усиления континентальности климата (1950–1976 гг.), более морского климата (1977–1998 гг.), и быстрого роста температуры воздуха у поверхности (1999–2020 гг.). Переход от периода усиления континентальности климата к периоду более морского климата связан с усилением влияния Северной Атлантики на исследуемый регион. Выдвинута гипотеза, что период быстрого роста температуры воздуха у поверхности вызван произошедшим переходом климатической системы западной части российской Арктики в новое фазовое состояние. Наблюдаемое потепление в Арктике вызвало сокращение морского льда, что привело к увеличению поглощения солнечной энергии поверхностью Баренцева и Белого морей.

Ключевые слова: изменения климата, температура, Арктика, Белое море, Баренцево море, морской лед, атмосферная циркуляция

© I. V. Serykh^{1,2*}, A. G. Kostianoy^{1,2,3}, S. A. Lebedev^{2,4,5}, E. A. Kostianaya^{1,2}, 2022

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 117997, Nahimovskiy prospekt, 36, Moscow, Russia

²Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 119296, Molodezhnaya St. 3, Moscow, Russia

³S.Yu. Witte Moscow University, 115432, 2-nd Kozhukhovskiy pr., 12, stroyeniye 1, Moscow, Russia

⁴National Research University of Electronic Technology (MIET), 124498, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia

⁵Maikop State Technological University, 385000, st. Pervomayskaya, 191, Maykop, Republic of Adygea, Russia

*E-mail: iserykh@ocean.ru

ON THE TRANSITION OF TEMPERATURE REGIME OF THE WHITE SEA REGION TO A NEW PHASE STATE

Received 17.09.2021, revised 15.01.2022, accepted 18.01.2022

Abstract

Changes in near surface air temperature (SAT) and vorticity of the wind speed field of the White Sea and the territory of the Murmansk and Arkhangelsk regions and the Republic of Karelia are investigated. We analyzed the monthly average NCEP/NCAR reanalysis data for the period 1950–2020. The average surface air temperature growth estimated using a linear trend was +0.24 °C/10 years. Against the background of this linear growth, significant interdecadal changes in surface air temperature are observed. The following periods are highlighted: the strengthening of the continentality of the climate (1950–1976), a more maritime climate (1977–1998), and the rapid growth of surface air temperature (1999–2020). The transition from a period of increasing continentality of the climate to a period of a more maritime climate is associated with an increase in the influence of the North

Ссылка для цитирования: 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. doi: 10.48612/fpg/k9x4-p8fz-5kz6

For citation: Serykh I.V., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Kostianaya 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. doi: 10.48612/fpg/k9x4-p8fz-5kz6

Atlantic on the region under study. A hypothesis has been put forward that the period of rapid growth of surface air temperature is caused by the transition of the climatic system of the western part of the Russian Arctic into a new phase state. The observed warming in the Arctic has caused a reduction in sea ice, which has led to an increase in solar energy absorption by the surface of the Barents and White Seas.

Keywords: climate change, temperature, Arctic, White Sea, Barents Sea, sea ice, atmospheric circulation

1. Введение

Субарктическая зона России особенно уязвима к изменению климата, поскольку в зоне многолетней мерзлоты расположена инфраструктура на сотни миллиардов долларов. В то же время, по данным наблюдений с середины 1970-х гг. средние температуры здесь растут в 2,5 раза быстрее, чем в целом по планете. Если произойдет оттаивание мерзлых толщ, то из-за значительного содержания в них льда, средняя осадка грунтов может составлять 10–20 см в год [1]. Железнодорожная инфраструктура в субарктических регионах эксплуатируется в чрезвычайно сложных инженерно-геологических и ландшафтно-климатических условиях, подвергаясь непрерывному воздействию различных внешних воздействий, приводящих к деформациям пути и искусственных сооружений [1]. Среди них: береговая абразия, селевые потоки, паводки, эрозия, оползни и сплывы, обвалы и осыпи, карстовые провалы, суффозионные просадки, наледи, термокарст, термоэрозия и солифлюкция, разрывные деформации, морозное пучение, снежные лавины и пр.

Островковые зоны многолетней мерзлоты находятся на Кольском полуострове [2]. Инфраструктура ОАО «РЖД» в этом регионе особенно уязвима перед негативными факторами регионального изменения климата, поскольку главной проблемой участка Волховстрой — Мурманск является тот факт, что из 1320 км его длины более 340 км составляют однопутные участки, что ограничивает его пропускную способность. Кроме того, 30 апреля 2020 г. Правительство РФ поставило задачу увеличить перевозки с 28 до 44 млн. т в год на участке Мурманского отделения Октябрьской железной дороги к 2023 г., а не к 2035-му, как планировали ранее, а к 2035 г. они должны вырасти до 100 млн. т (<https://tass.ru/ekonomika/9890949>, <https://rg.ru/2020/11/10/reg-szfo/propusknaia-sposobnost-zheleznodorozhnoj-infrastruktury-v-zapoliare-vyrastet.html>). В связи с этим, исследования изменений климата на территории Мурманской области, Республики Карелия и Архангельской области чрезвычайно важны для Российских железных дорог (РЖД). Данное исследование является продолжением работ, начатых в [3–5, 1].

С начала 2000-х гг. было опубликовано несколько работ по исследованию регионального изменения климата в исследуемом регионе, главным образом, в районе водосборного бассейна Белого моря и Карелии. Однако в большинстве работ период исследования ограничивался 2000 или 2011 годом, поэтому критические изменения климата в первые два десятилетия XXI века в них практически не были отражены. Кроме того, основные усилия были направлены на изучение водосборного бассейна Белого моря, который в большей части находится юго-восточнее Белого моря и исследуемого нами региона.

Так, например, в [6–8] показано, что для региона Белого моря с 1985 г. начался период, который характеризовался положительными аномалиями восточного переноса, при этом повторяемость западных форм переноса была близка к норме. Отрицательные аномалии температуры воздуха в конце 1980-х гг. сменились положительными до 2,0–2,5 °С, а аномалии атмосферного давления сменили знак с положительного на отрицательный. Понижение атмосферного давления объясняется увеличением западных переносов, усилением циклонической активности, а повышение температуры воздуха — поступлением теплых воздушных масс с Атлантики. Спектр колебаний температуры приземного воздуха в Архангельске за 176 лет выявил доминирующие колебания с периодом 4–5 и 11–13 лет, что свидетельствует о влиянии крупномасштабных климатических процессов на формирование долгопериодной изменчивости гидрометеорологических характеристик региона Белого моря. Ожидается, что температура воздуха в регионе к 2050 г. вырастет до 2,8–3,3 °С, т.е. на 1,8–2,3 °С относительно 1840 г. или на 0,5–1,0 °С относительно 2000 г. [8].

В [9, 10] рассмотрен температурный режим территории Карелии в 1950–2011 гг., показано, что начиная с 1989 г. наблюдаются только положительные аномалии температуры воздуха порядка 1–2 °С, по сравнению со средним значением за 1961–1990 гг. Наибольшее потепление наблюдается в зимний период и в марте от 0,3 °С до 0,6 °С/10 лет. Повышение температуры воздуха, очевидно, приводит к росту температуры почвы. Анализ данных наблюдений по вытяжным термометрам под естественным покровом на глубинах от 20 до 320 см показал, что в течение 1990-х и 2000-х гг. среднегодовая температура почвы на различных глубинах до 320 см на территории Карелии превышала климатическую норму на 1,0–1,5 °С в южных районах и на 0,5–1,0 °С в северных районах республики [10]. Следует отметить, что климатической нормой в южной Карелии является температура почвы –1,5...–2,0 °С на глубине 20 см с декабря до середины апреля, однако

в течение 1991–2011 гг. промерзание почвы отмечено не было, в то время как в центральных и северных районах оно еще сохранялось [10]. На остальных глубинах средние месячные значения температуры в течение года были положительными. В [11] по спутниковым данным за 2002–2019 гг. показано, что скорость роста температуры почвы в некоторых районах Кольского полуострова может достигать $+0,1$ °C/год.

В [12, 13] для анализа межгодовой изменчивости термического и ледового режима озер Карелии использованы также данные о температуре воздуха с прилегающих метеостанций. Анализ этих рядов за 1953–2011 гг. показал положительный тренд температуры воздуха $0,2$ – $0,3$ °C/10 лет, а в 1976–2014 гг. $0,57$ – $0,67$ °C/10 лет в районе между Ладожским озером и Белым морем, а на метеостанции Валаам (Ладожское озеро) до $+1,12$ °C/10 лет в июле.

В [14] для Кольского полуострова показано, что температура воздуха с 1878 по 2013 год росла со средней скоростью 1 °C/100 лет, при этом скорость роста заметно увеличилась в 1980–2009 гг. $+0,55$ °C/10 лет. В 2000–2009 гг. максимальные значения средних аномалий температуры приземного воздуха наблюдались зимой ($+1,8$ °C), а минимальные — летом ($+0,75$ °C). Авторы обратили внимание на существенную неоднородность изменений температуры на Кольском полуострове. Например, на Мурманском побережье, обращенном к Баренцеву морю, потепление заметно и статистически значимо, а на Терском и Кандалакшском берегах Белого моря значения тренда существенно меньше и практически незначимы. Это свидетельствует о мозаичности микроклиматических условий, которые для геоморфологических процессов в небольших бассейнах горных рек оказываются важнее региональных тенденций.

В [15, 16] для водосборного бассейна Белого моря показано, что на основе данных метеостанций средние значения температуры воздуха за 1991–2017 гг. повысились на $0,8$ – $1,2$ °C по сравнению со стандартным климатическим периодом — 1961–1990 гг. Данные наблюдений свидетельствуют о почти синхронном характере изменчивости среднегодовой температуры воздуха по всему водосбору Белого моря. Что касается разных сезонов года, то наибольшее повышение температуры зарегистрировано для зимних месяцев, особенно для января (средние значения за 1991–2017 гг. превышают климатические нормы на $1,7$ – $2,5$ °C).

В [17] для водосборного бассейна Онежского озера показано, что во второй половине XXI века температура воздуха повысится в среднем на $4,53$ °C по сравнению с периодом 1951–2000 гг, при этом существенное потепление ожидается именно в зимний период. Ожидается, что увеличение средних январских температур в 2001–2050 гг. произойдет на $5,6$ °C, а в 2051–2100 гг. на $8,6$ °C.

В [18] рассмотрен тепловой сток рек водосбора Белого моря и его изменчивость. Показано повышение температуры воды устьев рек водосбора Белого моря за 1956–2015 гг., особенно ярко выраженное с 1990 г. Проведенные модельные эксперименты показали, что повышение или понижение среднемесячной температуры воды в реках на 2 °C, а также изменение их водного стока на 30% не приведет к существенному изменению сроков ледообразования и разрушения льда в заливах Белого моря, а лишь изменит температуру воды в теплое время года.

В вышеперечисленных работах отмечалось, что последствия изменения климата на водосборе Белого моря существенным образом сказываются на рыболовстве, сельском и лесном хозяйстве (главным образом, за счет повышения температуры воздуха и воды Белого моря и рек), а дальнейшее изменение климата может повлиять на добычу полезных ископаемых, энергетику, транспорт и туризм, которые развиваются в Беломорье и на Кольском полуострове [16].

2. Данные и методы

В статье анализировались среднемесячные данные температуры воздуха у поверхности (ТВП) и скорости ветра на уровне сигма $0,995$ из NCEP/NCAR Reanalysis на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$ за период 1950–2020 гг. [19]. Уровень сигма $0,995$ является самым близким к поверхности уровнем модели, использующейся при усвоении данных в NCEP/NCAR Reanalysis, и приблизительно соответствует высоте $42,2$ м над поверхностью, причем отсчет высоты ведется от рельефа местности в каждом узле сетки. Под поверхностью имеется в виду твердая или жидкая поверхность суши или океана в зависимости от конкретного узла сетки. На уровне сигма $0,995$ атмосферное давление в данном узле сетки на данном временном шаге в $0,995$ раз превышает атмосферное давление у поверхности в этом узле сетки в это время.

В качестве дополнительных данных, использованных при обсуждении полученных результатов, привлечены среднемесячные значения концентрации морского льда (площадь, покрытая льдом любой сплошности, в процентах от общей площади моря), полученные осреднением среднесуточных значений из массива CMEMS EUMETSAT OSI SAF SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009 на сетке $12,5$ км за период 1979–2020 гг. [20]. Эти данные являются спутниковыми и покрывают высокие

широты Северного полушария. Дополнительно анализировались среднемесячные данные температуры океана на различных глубинах глобального океанического реанализа GECCO3 (German contribution of the Estimating the Circulation and Climate of the Ocean project) на сетке $1 \times 1^\circ$ за период 1948–2018 гг. [21].

В каждом узле сетки рассчитан средний за рассматриваемый период годовой ход исследуемых характеристик. Полученный отдельно для каждого узла сетки средний годовой ход вычитался из исходных данных для получения аномалий в каждом узле сетки относительно среднего годового хода (далее просто аномалий). Линейные тренды вычислялись с помощью метода наименьших квадратов.

Производилось осреднение аномалий ТВП для расширенного региона Белого моря ($61,25\text{--}71,25^\circ\text{с.ш.}$; $28,75\text{--}46,25^\circ\text{в.д.}$). Координаты указаны с учетом сетки NCEP/NCAR Reanalysis, поскольку каждый узел сетки содержит данные осредненные для своей окрестности $\pm 1,25^\circ$. В исследуемый регион попадают узлы сетки с широтами $62,5^\circ$, 65° , $67,5^\circ$, 70°с.ш. и долготами 30° , $32,5^\circ$, 35° , $37,5^\circ$, 40° , $42,5^\circ$, 45°в.д. Таким образом, исследуемый регион включает в себя всю акваторию Белого моря, часть юга Баренцева моря, всю территорию Мурманской области и республики Карелия и большую часть Архангельской области.

Для анализа типа атмосферной циркуляции в небольших регионах используют понятие завихренности, которая представляет собой $\zeta = \partial V/\partial x - \partial U/\partial y$, где U и V — зональная и меридиональная составляющие скорости ветра. С другой стороны, завихренность есть ротор от линий тока $\zeta = \text{rot}(\psi)$. Положительная величина ζ характеризует преобладание циклонической циркуляции, отрицательная — антициклонической. Данный подход позволил проанализировать изменчивость типа циркуляции над акваторией Черного и Каспийского морей [22–25], где проводился анализ межгодовой изменчивости завихренности как циркуляции моря, так и атмосферы над ним. По данной методике проводился анализ временной изменчивости среднемесячной завихренности скорости ветра на уровне сигма 0,995 для выделения периодов смены атмосферной циркуляции над районом исследования за 1950–2020 гг.

3. Результаты

На рис. 1 (зеленая линия) представлен временной ряд изменений средней ТВП в исследуемом регионе. Изменчивость среднемесячной ТВП составляет $\sim 35^\circ\text{C}$: от -18°C до $+17^\circ\text{C}$. При этом изменчивость локальных минимумов ТВП составляет $\sim 13^\circ\text{C}$: от -18°C до -5°C , что сильнее изменчивости локальных максимумов ТВП $\sim 6^\circ\text{C}$: от $+11^\circ\text{C}$ до $+17^\circ\text{C}$.

В рассматриваемый временной период имело место глобальное потепление климата, вызванное, по всей видимости, главным образом антропогенным воздействием [26]. Однако как глобальная, так и региональная климатические системы являются нелинейными, поэтому и их отклики на антропогенное воздействие также являются нелинейными. Но в настоящее время надежно и точно отделить нелинейный отклик климатической системы на антропогенный форсинг от её нелинейных откликов на другие внешние воздействия (например, на изменения солнечной активности) и от собственных колебаний системы (моды климатической изменчивости), на наш взгляд, представляется очень сложной задачей.

Линейная аппроксимация временного ряда изменений средней ТВП региона Белого моря демонстрирует её рост в среднем на $+0,24^\circ\text{C}$ за 10 лет (фиолетовая линия на рис. 1). Таким образом, за рассматриваемый 71 год рост ТВП составил приблизительно $+1,7^\circ\text{C}$. Однако следует принять во внимание, что примененный для оценки линейного тренда метод наименьших квадратов очень чувствителен к краевым значениям. А на краевые значения, в свою очередь, влияет межгодовая и межсезонная изменчивость исследуемого ряда. Более того, далее будет показано, что изменения ТВП рассматриваемого региона можно разделить на три различных периода, а для анализа такого поведения системы лучше применять аппроксимацию ступенчатой функцией.

Межгодовая (рис. 1, черная кривая линия) и межсезонная (рис. 1, красные и синие круги) изменчивость средних аномалий ТВП в рассматриваемом регионе демонстрирует большой диапазон значений, как между отдельными годами, так и отдельными сезонами. При этом изменчивость аномалий ТВП между зимними периодами (декабрь — февраль) сильнее, чем между летними периодами (июнь — август).

На рис. 2 представлена изменчивость средних аномалий ТВП исследуемого региона после применения низкочастотных фильтров для выделения более продолжительных изменений. На временных рядах рис. 2 на фоне линейного роста аномалий ТВП можно выделить три периода с отличающимися характеристиками. Первый период 1950–1976 гг. характеризуется сильными положительными аномалиями ТВП в теплые полугодия (май — октябрь). Во второй период 1977–1998 гг. ситуация изменилась и сильные положительные аномалии ТВП стали наблюдаться в основном в холодные полугодия, а в теплые полугодия стали наблюдаться в основном отрицательные аномалии. Третий период 1999–2020 гг. характеризуется резким ростом аномалий ТВП как в холодный (до $+3^\circ\text{C}$), так и в теплый период года (до $+2^\circ\text{C}$).

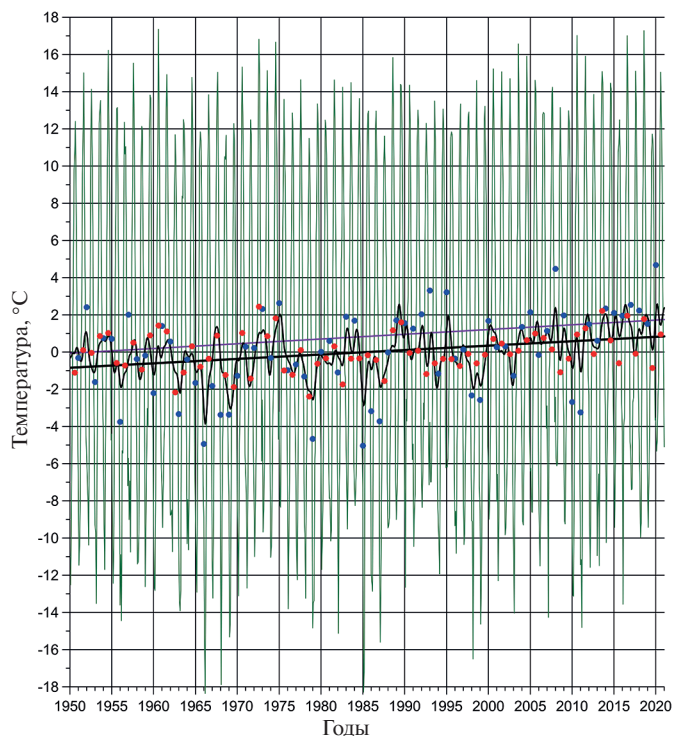


Рис. 1. Изменения средней температуры воздуха у поверхности (ТВП) в регионе Белого моря (зеленый), и линейное приближение этого временного ряда (фиолетовый) за 1950–2020 гг. Изменения средних аномалий ТВП в регионе Белого моря, сглаженные 1-летним фильтром Баттерворта нижних частот (черный), и их линейный тренд (черная прямая линия). Кругами отмечены средние значения аномалий ТВП для лета (июнь — август) (красный) и зимы (декабрь — февраль) (синий).

Fig. 1. Changes in mean near surface air temperature (SAT) in the White Sea region (green), and a linear approximation of this time series (purple) for 1950–2020. Changes in mean SAT anomalies in the White Sea region, smoothed by a 1-year low-pass Butterworth filter (black), and their linear trend (black straight line). The circles indicate the mean values of the SAT anomalies for summer (June — August) (red) and winter (December — February) (blue)

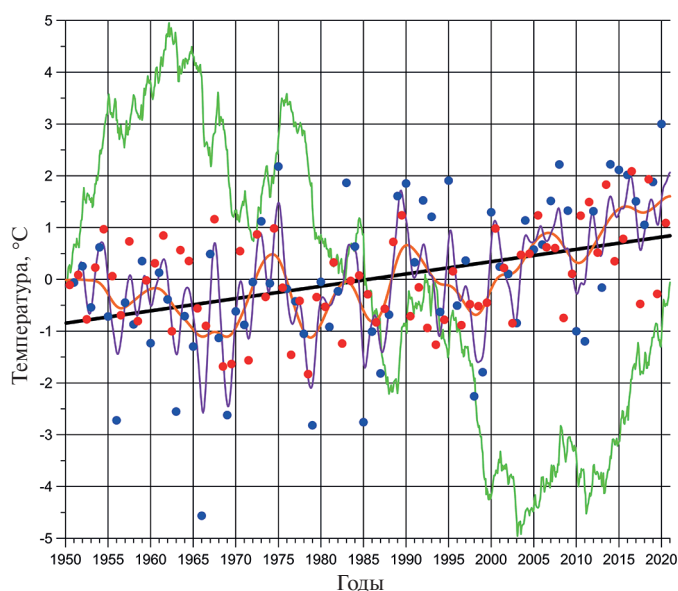


Рис. 2. Изменения средних аномалий температуры воздуха у поверхности (ТВП) в регионе Белого моря за 1950–2020 гг., сглаженные 2-летним (фиолетовый) и 7-летним (оранжевый) фильтрами Баттерворта нижних частот. Их линейный тренд (черный) и накопленная сумма аномалий после удаления линейного тренда (зеленый). Кругами отмечены средние значения аномалий для теплого (май — октябрь) (красный) и холодного (ноябрь — апрель) (синий) полугодий.

Fig. 2. Changes in mean near surface air temperature (SAT) anomalies in the White Sea region for 1950–2020, smoothed by 2-year (purple) and 7-year (orange) low-pass Butterworth filters. Their linear trend (black) and the accumulated sum of anomalies after the removal of the linear trend (green) are drawn. The circles mark the average values of the anomalies for the warm (May — October) (red) and cold (November — April) (blue) seasons

Существование указанных трех периодов различного климата подтверждает поведение графика накопленной суммы аномалий ТВП после удаления линейного тренда (рис. 2, зеленый). Накопленная сумма позволяет выделить длительные (междекадные) изменения, не применяя при этом фильтрацию с большим окном, которая может исказить результат, особенно на краях исследуемого ряда. График накопленной суммы аномалий ТВП в основном снижается с 1977 года до приблизительно 1999 года, в 2000-х стабилизируется, а в 2010-х начинает быстро расти. Подтверждая, таким образом, резкий рост ТВП в третий период (1999–2020 гг.), в 2–3 раза превышавший по своей величине средний рост ТВП за весь исследуемый период (+0,24 °C за 10 лет).

Анализ временной изменчивости среднемесячной завихренности скорости ветра на уровне сигма 0,995 (рис. 3) показал, что в поле завихренности можно выделить три периода ее роста и падения. Эти периоды связаны с ослаблением циклонической циркуляции или ее усилением. Так в периоды 1950–1972 гг. и 1999–2020 гг. наблюдается период ослабления циклонической циркуляции, а в период 1973–1998 гг. ее усиление.

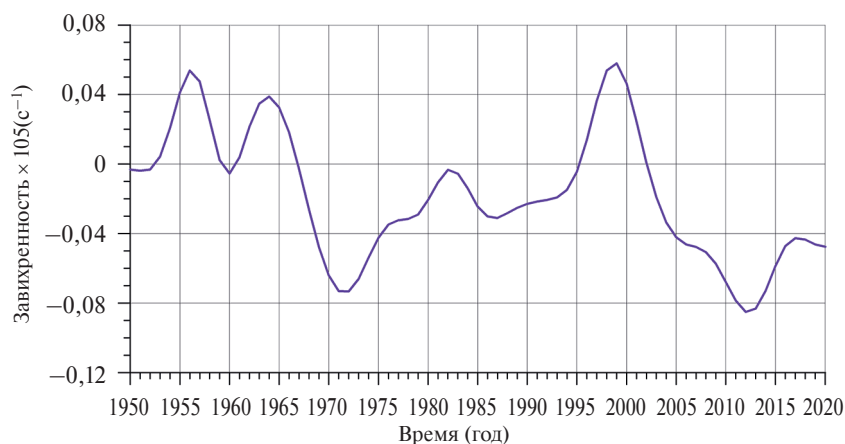


Рис. 3. Временная изменчивость среднегодовой (после медианной фильтрации) завихренности поля скорости ветра на уровне сигма 0,995 за 1950–2020 гг.

Fig. 3. Temporal variability of the mean annual (after the median filtration) vorticity of the wind speed field at a sigma level of 0.995 for 1950–2020

На рис. 4 представлены поля средних ТВП за весь рассматриваемый период (рис. 4, *a*) и за выделенные три периода (рис. 4, *б–г*). Отметим, что все узлы сетки, которые используются при построении графиков рис. 1–3, представлены на этих полях, но эти поля расширены на юг, и дополнительно включают в себя

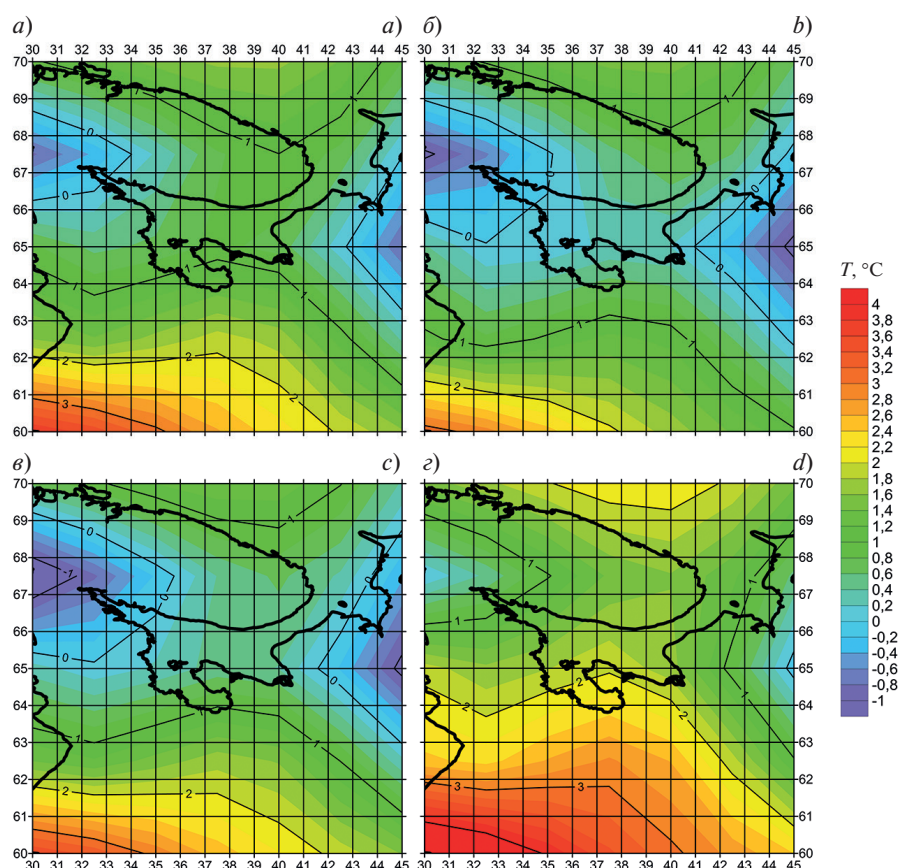


Рис. 4. Поля средних температур воздуха у поверхности (ТВП) за периоды: *a* — 1950–2020 гг.; *б* — 1950–1976 гг.; *в* — 1977–1998 гг.; *г* — 1999–2020 гг.

Fig. 4. Fields of mean near surface air temperatures (SAT) for the periods: *a* — 1950–2020; *b* — 1950–1976; *c* — 1977–1998; *d* — 1999–2020

данные из узлов сетки с широтами $60,0^{\circ}\text{ш.}$ На рис. 4 обращает на себя внимание то, что в первые два периода (1950–1976 и 1977–1998 гг.) средние ТВП мало отличались, но в третий период (1999–2020 гг.) произошел существенный сдвиг средних ТВП по сравнению с двумя предыдущими периодами. В первые два периода на юго-западе Кольского полуострова в регионе ($66,5\text{--}68,5^{\circ}\text{ш.}; 30\text{--}34^{\circ}\text{в.д.}$) и на востоке Архангельской области ($64\text{--}67^{\circ}\text{ш.}; 43\text{--}45^{\circ}\text{в.д.}$) средние ТВП были немного ниже нуля (рис. 4, б — в), из-за чего там могли существовать островковые зоны многолетней мерзлоты [2]. В третий период средние ТВП стали выше нуля во всей области исследования (рис. 4, г), из-за чего следует ожидать таяния многолетней мерзлоты в этих регионах. Интересной особенностью произошедших изменений является тот факт, что продвижение тепла с юга на север (например, изотерма 2°C на долготе 38°в.д. поднялась с 60°ш. практически до 65°ш.) привело не к смещению холодных областей к северу, а к их выжиманию на запад и восток, соответственно. Кроме того, на градус потеплела атмосфера и над южной частью Баренцева моря (рис. 4, г).

На рис. 5 представлены поля оцененных с помощью линейного приближения изменений аномалий ТВП за весь рассматриваемый период и за выделенные три периода. Видно, что за весь рассматриваемый период рост ТВП составлял в среднем от $+0,1$ до $+0,4^{\circ}\text{C}$ за 10 лет (рис. 5, а). Однако в первый выделенный период наблюдалось понижение ТВП на большей территории исследуемого региона, в особенности, в указанных выше районах существования многолетней мерзлоты (рис. 5, б). Во второй период наблюдался рост ТВП в среднем от $+0,1$ до $+0,4^{\circ}\text{C}$ за 10 лет (рис. 5, в). В третий же период этот рост существенно ускорился и составил в среднем от $+0,4$ до $+1,0^{\circ}\text{C}$ за 10 лет (рис. 5, г). Причем, наиболее сильный рост ТВП наблюдался в северо-восточной части рассматриваемого региона, на акватории Белого и Баренцева моря.

На рис. 6 представлены поля изменений (разности) средней ТВП между выделенными периодами. Во второй период (1977–1998 гг.) по сравнению с первым (1950–1976 гг.) средняя ТВП увеличилась в основ-

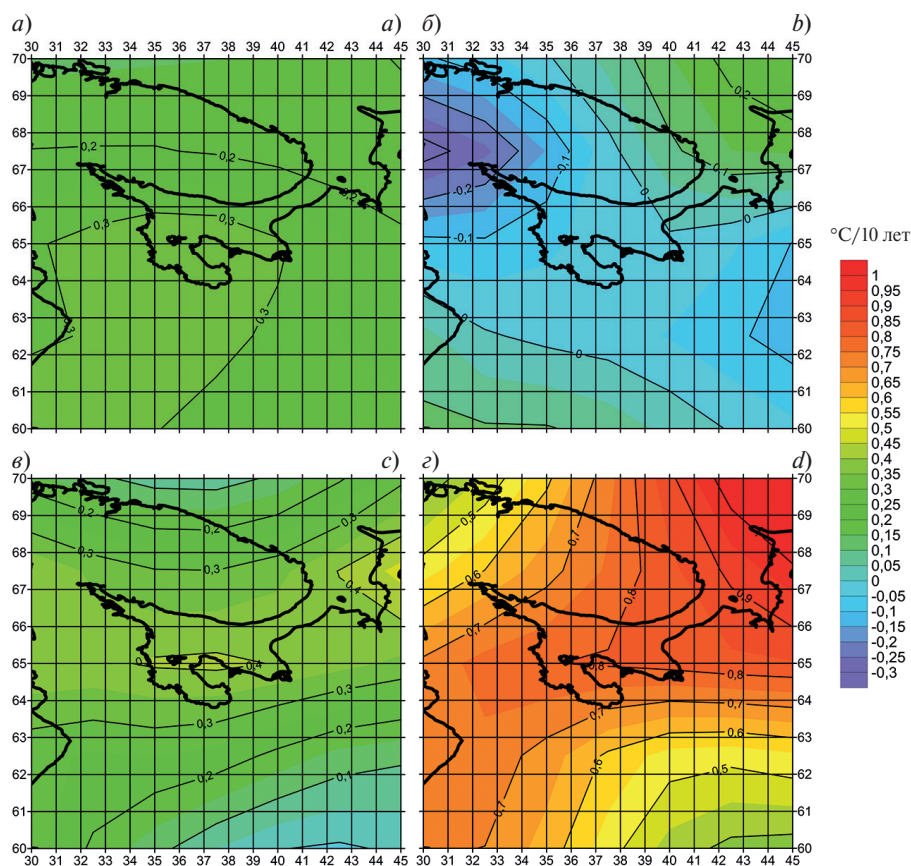


Рис. 5. Поля изменений аномалий температуры воздуха у поверхности (ТВП) оцененных с помощью линейных трендов за периоды: а — 1950–2020 гг.; б — 1950–1976 гг.; в — 1977–1998 гг.; г — 1999–2020 гг.

Fig. 5. Fields of changes in near surface air temperature (SAT) anomalies estimated using linear trends for the periods: а — 1950–2020; б — 1950–1976; в — 1977–1998; г — 1999–2020

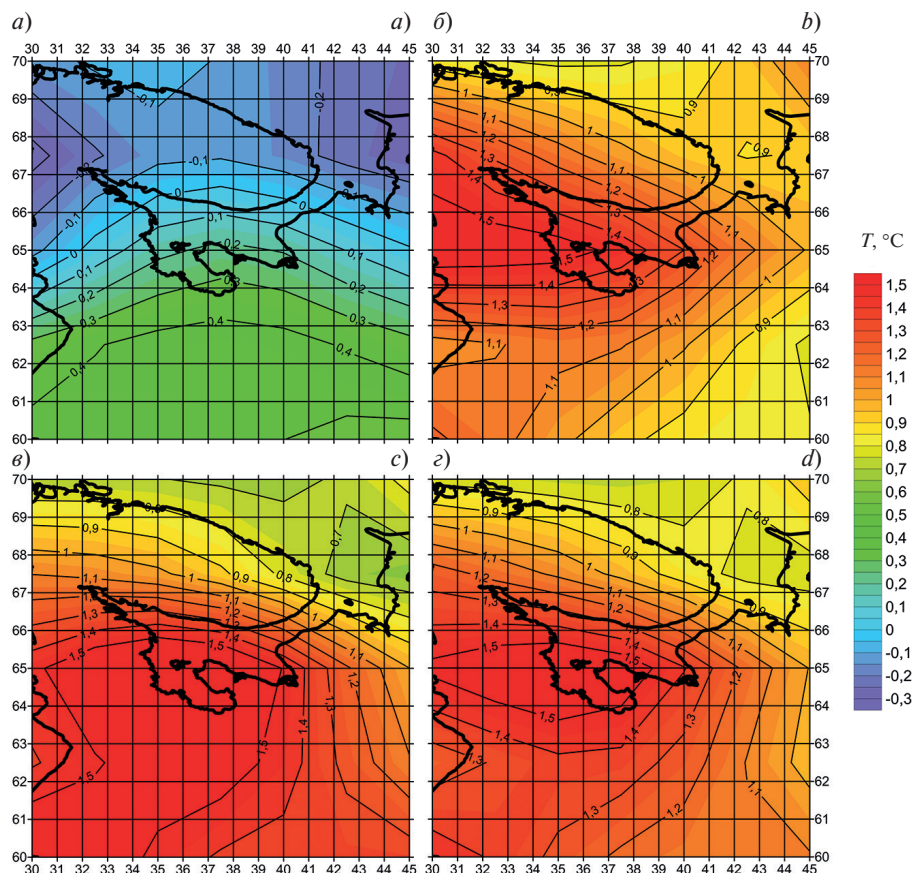


Рис. 6. Поля изменений средней температуры воздуха у поверхности (ТВП) между периодами: *a* — 1977–1998 гг. и 1950–1976 гг.; *б* — 1999–2020 гг. и 1977–1998 гг.; *в* — 1999–2020 гг. и 1950–1976 гг.; *г* — 1999–2020 гг. и 1950–1998 гг.

Fig. 6. Fields of changes in mean near surface air temperature (SAT) between the periods: *a* — 1977–1998 and 1950–1976; *b* — 1999–2020 and 1977–1998; *c* — 1999–2020 and 1950–1976; *d* — 1999–2020 and 1950–1998

ном в южной части рассматриваемого региона (рис. 6, *a*). В северной же части средняя ТВП во второй период стала ниже, чем в первый. В третий период (1999–2020 гг.) средняя ТВП существенно выросла во всем рассматриваемом регионе по отношению ко второму (рис. 6, *б*), первому (рис. 6, *в*) и ко всему предшествующему периоду (рис. 6, *г*). Наиболее сильно средняя ТВП в третий период увеличилась в центре западной части рассматриваемого региона, включая акваторию Белого моря.

4. Дискуссия

Обнаруженные изменения ТВП региона Белого моря между выделенными периодами могут быть связаны как с антропогенным глобальным потеплением, так и с влиянием на исследуемый регион естественных мод климатической изменчивости. В Тихом океане в 1976/1977 и 1998/1999 гг. произошли климатические сдвиги (climate shifts) [27–31]. Они проявились в переходах между противоположными фазами Тихоокеанского декадного колебания (Pacific Decadal Oscillation — PDO) и Междекадного тихоокеанского колебания (Interdecadal Pacific Oscillation — IPO) [32–34]. Эти климатические сдвиги оказали глобальное влияние, в том числе и на регион Северной Атлантики [34, 35].

Северная Атлантика оказывает существенное влияние на рассматриваемый регион Белого моря. Первый выделенный период (1950–1976 гг.) отличается холодными зимами и жаркими летними периодами, то есть более континентальным климатом. Как показано в работах [36, 37], это связано с ослаблением влияния в этот период Северной Атлантики на исследуемый регион, что также подтверждается ослаблением циклонической завихренности (рис. 3). Во второй выделенный период (1977–1998 гг.) зимы стали мягче, а летние аномалии ТВП стали в основном отрицательными. То есть климат исследуемого региона

стал более морским по сравнению с предыдущим периодом. Это связано с усилением влияния Северной Атлантики на исследуемый регион во второй период [36, 37]. Как показано в работе [35] усиление влияния Северной Атлантики в 1977–1998 гг. на регион Белого моря явилось результатом изменения циркуляции атмосферы над Северной Атлантикой и Европой. Это проявилось и в усилении циклонической завихренности атмосферы региона Белого моря (рис. 3).

В третий выделенный период (1999–2020 гг.) наблюдается резкий рост ТВП в исследуемом регионе. Можно предположить, что это связано с резким ростом температуры в Арктике в этот период [38], и существенным сокращением площади морского льда в Баренцевом море (рис. 7) [39]. Это послужило причиной усиления положительной обратной связи в виде ослабления стратификации верхнего слоя воды Баренцева моря, усиления перемешивания и поднятия более теплых и соленых атлантических вод к поверхности [40]. Также дополнительный вклад в рост температуры воды верхнего слоя Баренцева и Белого морей вносит положительная обратная связь от поглощения солнечного излучения: при потеплении Арктики площадь льда уменьшается, и это приводит к большему поглощению солнечного излучения поверхностью [41]. Таким образом, резкий рост ТВП в третий выделенный период, по-видимому, связан с усилением действия обратных положительных связей, что означает переход климатической системы исследуемого региона Белого моря в новое фазовое состояние.

К сожалению, на данные по концентрации морского льда в узлах сетки, содержащих береговую линию, оказывают сильное влияние ошибки алгоритма обработки спутниковых данных [20]. Это позволяет усомниться в надежности данных по концентрации морского льда для существенной части акватории Белого моря из-за его малых размеров и сложной конфигурации. Поэтому результаты изменений концентрации морского льда (рис. 7) следует, прежде всего, рассматривать для Баренцева и Карского морей. Поле изменений средней концентрации морского льда (рис. 7) приведено в равновеликой азимутальной проекции Ламберта, которая точно представляет площадь во всех областях сферы. Это позволяет правильно оценить площадь сокращения концентрации морского льда в регионе Баренцева и Карского морей.

Потепление климата Арктики и сокращение ледового покрова Баренцева и Карского морей не могло не сказаться на климате региона Белого моря. Исходя из этого, исследуемый регион был расширен с вклю-

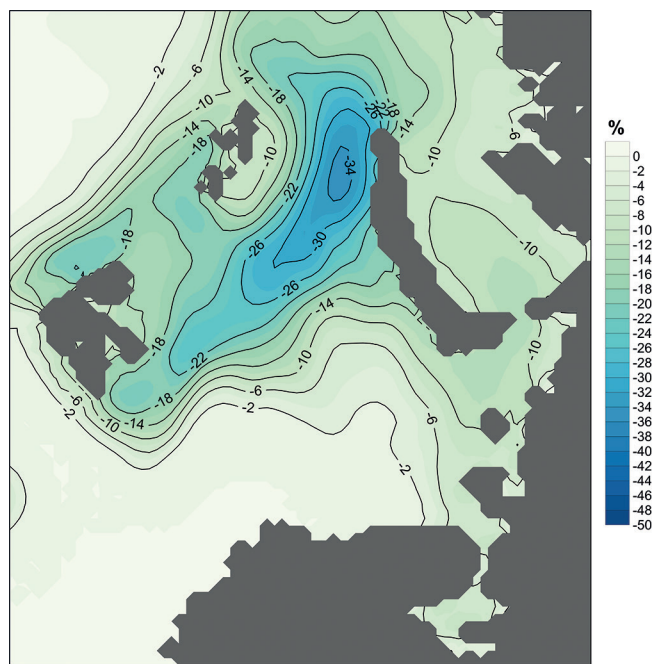


Рис. 7. Поле изменений (разности) средней концентрации (%) морского льда Белого, Баренцева и Карского морей между периодами 1999–2020 гг. и 1979–1998 гг. в равновеликой азимутальной проекции Ламберта

Fig. 7. Field of changes (difference) in the average concentration (%) of the sea ice in the White, Barents and Kara seas between the periods 1999–2020 and 1979–1998 in Lambert equal-area projection

чением акватории Баренцева моря и частично Карского моря (65–82°с.ш.; 15–70°в.д.). Для всего этого расширенного региона были построены графики изменений средних аномалий ТВП и аномалий температуры океана на различных глубинах (рис. 8). В случае аномалий температуры океана выбирались те узлы сетки, которые попадают в регион (65–82°с.ш.; 15–70°в.д.) и не являются сушей.

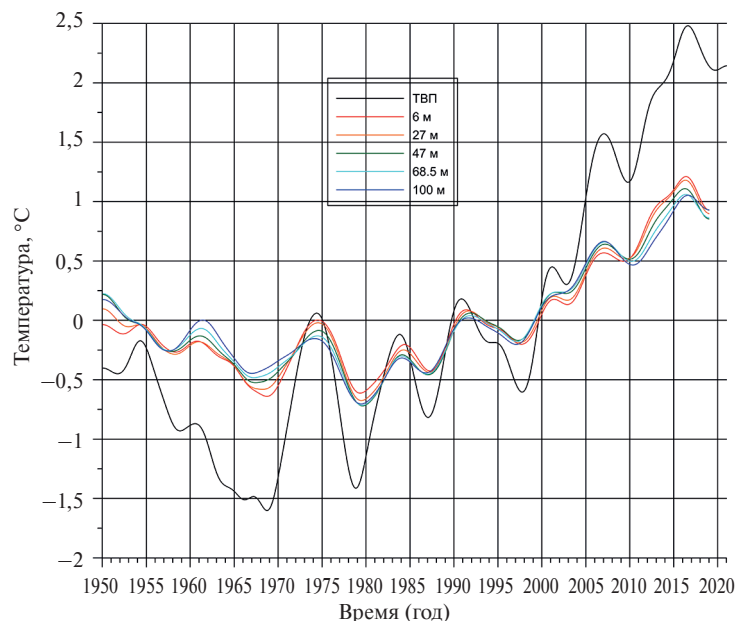
На рис. 8 наблюдается быстрый рост температуры в регионе (65–82°с.ш.; 15–70°в.д.) начиная с 1999 года. Причем рост температуры с 1999 года по 2007 гг. на глубинах 47–100 м начался раньше и превзошел рост температуры у поверхности на глубинах 6–27 м. В регионе Баренцева моря наблюдается квази-15-летнее колебание температуры вызванное, прежде всего, адвекцией тепла из Северной Атлантики [41]. Возможно, что именно это колебание и послужило одной из причин быстрого роста температуры в 2000-х гг. Таким образом, наличие обратных связей между региональными изменениями температуры воздуха над акваторией и концентрации морского льда в Баренцевом и Карском морях требует дополнительных исследований.

5. Заключение

Проведенное исследование показало, что в регионе Белого моря в последние 2 десятилетия (1999–

Рис. 8. Изменения средних аномалий температуры воздуха у поверхности (ТВП) за 1950–2020 гг. (черный), и аномалий температуры океана на глубинах 6 м (красный), 27 м (оранжевый), 47 м (зеленый), 68,5 м (голубой) и 100 м (синий) за 1950–2018 гг. в регионе (65–82°с.ш.; 15–70°в.д.), сглаженные 7-летним фильтром Баттерворта нижних частот

Fig. 8. Changes in mean anomalies of surface air temperature (SAT) for 1950–2020 (black), and ocean temperature anomalies at depths of 6 m (red), 27 m (orange), 47 m (green), 68.5 m (blue) and 100 m (dark blue) for 1950–2018 in the region (65°–82° N; 15°–70° E), smoothed with a 7-year Butterworth low-pass filter



2020 гг.) проявляется существенная изменчивость регионального климата, которая выразилась в потеплении этого региона от +0,9 до +1,5 °C по сравнению с предыдущими годами (1977–1998 гг.), в резком увеличении роста температуры воздуха (+0,4 — +1,0 °C за 10 лет), к смещению изотермы +2 °C на 550 км на север вплоть до южной части Белого моря и к полному исчезновению средних отрицательных температур.

Резкий рост ТВП в исследуемом регионе, вероятно, связан с резким ростом температуры воздуха и моря Баренцева и Карского морей, начиная с 1999 г. (рис. 8), а также с существенным сокращением ледяного покрова Баренцева и Карского морей (рис. 7). Резкий рост ТВП в третий выделенный период, по-видимому, связан с усилением действия обратных положительных связей между океаном и атмосферой. Ослабление стратификации верхнего слоя воды Баренцева моря в результате потепления, и усиления перемешивания и поднятия более теплых и соленых атлантических вод к поверхности могло привести к значительному росту температуры поверхности моря. Дополнительный вклад в рост температуры воды верхнего слоя Баренцева и Карского морей вносит положительная обратная связь от поглощения солнечного излучения в результате уменьшения площади ледяного покрова. Кроме того, межгодовая изменчивость аномалий температуры воды Баренцева и Карского морей показала, что существуют периоды времени, когда аномалии температуры воды на глубинах 47–100 м превосходят соответствующие аномалии в приповерхностном слое (рис. 8), что означает периодическое (квази-15-летнее колебание) доминирующее влияние адвекции тепла, приносимого течениями из Норвежского моря. Именно этот эффект в период 1999–2007 гг. вносил существенный вклад, когда на фоне резкого роста температуры воды и воздуха, аномалии температуры воды на глубинах 47–100 м превосходили соответствующие аномалии на глубинах 6–27 м.

Исчезновение средних отрицательных температур воздуха является чрезвычайно важным фактом, поскольку это означает фазовый переход, который приведет к растеплению вечномёрзлых грунтов на всей территории Мурманской и Архангельской областей. Растепление вечномёрзлых грунтов и значительное повышение средних температур приведет к изменению водного баланса многочисленных рек и озер исследуемого региона, к усилению таких геоморфологических процессов как водоснежные потоки (разновидность селей) и оползни-сплывы [14] и может оказать негативное воздействие на транспортную инфраструктуру [42], в том числе на инфраструктуру и работоспособность ОАО «РЖД» в исследуемом регионе.

В [42] показано, что для территории Кольского полуострова, отличающейся высокотемпературной многолетней мерзлотой редкоостровного характера, объекты, основание которых образовано сваями глубиной 5 м и менее, подвергаются очень высоким рискам снижения своей функциональности, вплоть до нулевого уровня. Так, например, при относительно небольшом потеплении до +1 °C сваи глубиной 5 м, как правило, еще обеспечивают функциональность $U = 0,65–0,85$ ($U = 1$ соответствует максимальному уровню функциональности для базового, неизменного климата), что считается средним уровнем климатического риска в отношении объекта транспортной инфраструктуры. Потепление до +2 °C зачастую уже приводит к снижению функциональности до $U < 0,5$ (при наличии грунтов низкой влажности), а потепление до +3 °C для объектов этой группы можно считать катастрофическим; функциональность снижается до уровня

$U = 0-0,35$, что соответствует неприемлемо большому уровню климатических рисков. Из проведенного исследования следует чрезвычайно важный вывод: объекты на свайных основаниях с глубиной менее 6 м подвергаются повышенному риску уже при потеплении до $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому инженерная защита этих объектов должна осуществляться темпами, опережающими потепление регионального климата [42].

6. Финансирование

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ N21–77–30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта» (2021–2024 гг.).

Литература

1. Kostianaia E.A., Kostianoy A.G., Scheglov M.A., Karelov A.I., Vasileisky A.S. Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport // *Transport and Telecommunication*. 2021. Vol. 22, No 2. P. 183–195.
2. *Мировой опыт по строительству, содержанию и ремонту объектов железнодорожной инфраструктуры в условиях многолетнемёрзлых грунтов*. Центр научно-технической информации и библиотек, 2017. 126 с.
3. Serykh I.V., Kostianoy A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature // *Ecologica Montenegro*. 2019. Vol. 25. P. 1–13.
4. Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Балтийского моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 3. С. 5–12. doi: 10.7868/S207366731903002X
5. Серых И.В., Толстиков А.В. О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2020. № 4. С. 83–95.
6. Филатов Н.Н. (Ред.) Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 224 с.
7. Filatov N., Johannessen O.M., Pozdnyakov D., Bobylev L.P., Pettersson L. White Sea: Its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Springer-Praxis, Chichester, UK, 2005. 530 p.
8. Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю. (Ред.) Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, 2007. 349 с.
9. Назарова Л.Е. Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // *Изв. Русского географического общества*. 2014. Т. 46. С. 27–33.
10. Назарова Л.Е. Климат Республики Карелия (Россия): температура воздуха, изменчивость и изменения // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2014. Т. 10, № 1. С. 746–749.
11. Тронин А.А., Горный В.И., Киселев А.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Спутниковое картирование тепловой реакции экосистем Северной Европы на изменение климата // *Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева*. 2020. С. 72–78.
12. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. Влияние изменений климата на термический и ледовый режим озер Карелии по данным инструментальных наблюдений // *Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения Г.М. Крепса и 110-летию со дня рождения О.И. Семенова-Тян-Шанского*. 2016. С. 189–193.
13. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белашев Б.З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // *Водные ресурсы*. 2016. Т. 43, № 2. С. 228–238.
14. Романенко Ф.А., Шиловцева О.А. Геоморфологические процессы в горах Кольского полуострова и изменения климата // *Вестник Московского университета, Серия 5 География*. 2016. № 6. С. 78–86.
15. Назарова Л.Е. Современные климатические условия водосбора Белого моря // *Известия РГО*. 2017. Т. 149, № 5. С. 16–24.
16. Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Дружинин П.В. Влияние климатических и антропогенных факторов на состояние системы «Белое море — водосбор» // *Труды КарНЦ РАН*. 2019. № 9. С. 30–50.
17. Кондратьев С.А., Назарова Л.Е., Шмакова М.В., Бовыкин И.В. Оценка изменений стока на водосборе Онежского озера в результате возможных изменений климатических параметров (по данным математического моделирования). С.-Петербург: Институт озераедения РАН, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2007. 30 с.
18. Толстиков А.В., Балаганский А.Ф., Чернов И.А. Оценка теплового стока рек водосбора Белого моря. *Вестник Московского университета // Серия 5. География*. 2021. Т. 3. С. 109–119.
19. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. The NCEP/NCAR40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Vol. 77. P. 437–471.

20. Eastwood S., Laverne T., Tonboe R., Hackett B. Product user manual for reprocessed sea ice concentration from EUMETSAT OSI SAF SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009 Version 2.4 / Copernicus. 2016. P. 1–45.
21. Köhl A. Evaluating the GECCO3 1948–2018 Ocean Synthesis — a configuration for initializing the MPI-ESM climate model // Q. J. R. Met. Soc. 2020. Vol. 146. P. 2250–2273.
22. Михайлова Э.Н., Полонский А.Б., Шокурова И.Г. О связи интенсивности циркуляции в Черном море с завихренностью поля ветра // Український гідрометеорологічний журнал. 2013. Т. 12. С. 193–203.
23. Шокуров М.В., Шокурова И.Г. Завихренность напряжения трения ветра на поверхности Черного моря при различных ветровых режимах // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 13–26. doi: 10.22449/0233-7584-2017-6-13-26
24. Lebedev S. Climatic variability of water circulation in the Caspian Sea based on satellite altimetry data // International Journal of Remote Sensing. 2018. Vol. 39, № 13. P. 4343–4359.
25. Аверьянова Е.А., Губарев А.В., Полонский А.Б. О пространственно-временной изменчивости и трендах завихренности касательного напряжения трения ветра в Черном море // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 1. С. 21–36.
26. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Cambridge University Press. In Press.
27. Hare S.R., Mantua N.J. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989 // Progress in Oceanography. 2000. Vol. 47 (2–4). P. 103–145.
28. Bond N.A., Overland J.E., Spillane M., Stabeno P. Recent shifts in the state of the North Pacific // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30 (23).
29. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. On the spatial nonuniformity of some parameters of global variations in the recent climate // Doklady Earth Sciences. 2009. Vol. 426, No 4. P. 705–709.
30. Ding H., Greatbatch R.J., Latif M., Park W., Gerdes R. Hindcast of the 1976/77 and 1998/99 Climate Shifts in the Pacific // Journal of Climate. 2013. Vol. 26. P. 7650–7661.
31. Belolipetsky P., Bartsev S., Ivanova Y., Saltykov M. Hidden staircase signal in recent climate dynamic // Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences. 2015. Vol. 51. P. 323–330.
32. Folland C.K., Renwick J.A., Salinger M.J., Mullan A.B. Relative influences of the Interdecadal Pacific Oscillation and ENSO in the South Pacific Convergence Zone // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29, No 13. P. 21–24.
33. Mantua N.J., Hare S.R. The Pacific Decadal Oscillation // Journal of Oceanography. 2002. Vol. 58, No 1. P. 35–44.
34. Dong B., Dai A. The influence of the interdecadal pacific oscillation on temperature and precipitation over the globe // Climate Dynamics. 2015. V. 45. P. 2667–2681.
35. Serykh I.V. Influence of the North Atlantic dipole on climate changes over Eurasia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. Vol. 48. 012004.
36. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики // Доклады Академии наук (ДАН). 2011. Т. 438, № 6. С. 817–822.
37. 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. Vol. 174, № 7. P. 2863–2878.
38. Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // Nature geoscience. 2014. Vol. 7, № 9. P. 627–637.
39. Onarheim I.H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, No 16. P. 8387–8395.
40. Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // Nature climate change. 2018. Vol. 8, No 7. P. 634–639.
41. Володин Е.М. О механизме колебания климата в Арктике с периодом около 15 лет по данным модели климата ИВМ РАН // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 2. С. 139–149.
42. Якубович А.Н., Якубович И.А. Прогнозирование влияния климатических изменений на функциональность транспортной инфраструктуры криолитозоны России. // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2019. № 1. С. 104–110.

References

1. Kostianaya E.A., Kostianoy A.G., Scheglov M.A., Karelov A.I., Vasileisky A.S. Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport. *Transport and Telecommunication*. 2021, 22, 2, 183–195.
2. *World experience in the construction, maintenance and repair of railway infrastructure facilities in permafrost conditions*. Center for Scientific and Technical Information and Libraries. 2017, 126 p. (in Russian).

3. Serykh I.V., Kostianoy A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature. *Ecologica Montenegrina*. 2019, 25, 1–13. doi: 10.37828/em.2019.25.1
4. Serykh I.V., Kostianoy A.G. On climatic changes in the temperature of the Baltic Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019, 12, 3, 5–12 (in Russian). doi: 10.7868/S207366731903002X
5. Serykh I.V., Tolstikov A.V. On the reasons for the long-term variability of the near-surface air temperature over the White Sea. *Moscow University Bulletin. Series 5: Geography*. 2020, 4, 83–95 (in Russian).
6. Filatov N.N. (Ed.) Climate of Karelia: variability and impact on water bodies and catchments. *Petrozavodsk, KarRC RAS*, 2004. 224 p. (in Russian).
7. Filatov N., Johannessen O.M., Pozdnyakov D., Bobylev L.P., Pettersson L. White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. *Springer-Praxis, Chichester, UK*, 2005, 530 p.
8. Filatov N.N., Terzhevik A. Yu. (Ed.) The White Sea and its catchment area under the influence of climatic and anthropogenic factors. *Institute of Northern Water Problems, KarRC RAS, Petrozavodsk*, 2007. 349 p. (in Russian).
9. Nazarova L.E. Variability of mean long-term values of air temperature in Karelia. *Izvestiya Russian Geographical Society*. 2014, 46, 4, 27–33 (in Russian).
10. Nazarova L.E. Climate of the Republic of Karelia (Russia): air temperature, variability and changes. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*. 2014, 10, 1, 746–749 (in Russian).
11. Tronin A.A., Gornyy V.I., Kiselev A.V., Kritsuk S.G., Latypov I. Sh. Satellite mapping of the thermal response of northern European ecosystems to climate change. *Proceedings All-Russian scientific conference with international participation “Earth and Space” to the centenary of Academician of the Russian Academy of Sciences K. Ya. Kondratyev*. 2020, 72–78 (in Russian).
12. Efremova T.V., Pal'shin N.I. Influence of climate changes on the thermal and ice regime of the lakes of Karelia according to the data of instrumental observations). *Ekologicheskiye Problemy Severnykh Regionov i Puti ikh Resheniya*. Materialy VI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 120-letiyu so dnya rozhdeniya G.M. Krepsa i 110-letiyu so dnya rozhdeniya O.I. Semenova-Tyan-Shanskogo. 2016, 189–193 (in Russian).
13. Efremova T.V., Pal'shin N.I., Belashev B.Z. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953–2011. *Water Resources*. 2016, 43, 402–411. doi: 10.1134/S0097807816020020
14. Romanenko F.A., Shilovtseva O.A. Geomorphological processes in the mountains of the Kola Peninsula and climate change. *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 5, Geografiya*. 2016, 6, 78–86 (in Russian).
15. Nazarova L.E. Modern climatic conditions of the White Sea catchment area. *Izvestiya RGS*. 2017, 149, 5, 16–24 (in Russian).
16. Filatov N.N., Nazarova L.E., Druzhinin P.V. Influence of climatic and anthropogenic factors on the state of the “White Sea — catchment” system. *Transactions of Karelian Research Center of Russian Academy of Science*. 2019, 9, 30–50 (in Russian).
17. Kondratyev S.A., Nazarova L.E., Shmakova M.V., Bovykin I.V. Assessment of runoff changes in the drainage basin of Lake Onega as a result of possible changes in climatic parameters (according to mathematical modeling). *Institute of Lake Science RAS, Institute of Water Problems of the North, KarRC RAS*. St. Petersburg, 2007. 30 p. (in Russian).
18. 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. Seriya 5, Geografiya*. 2021. V. 3.P. 109–119 (in Russian).
19. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996, 77, 437–471. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
20. Eastwood S., Laverne T., Tonboe R., Hackett B. Product user manual for reprocessed sea ice concentration from EUMETSAT OSI SAF SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009 Version 2.4 / Copernicus. 2016, 1–45.
21. Köhl A. Evaluating the GECCO31948–2018 Ocean Synthesis — a configuration for initializing the MPI-ESM climate model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, 146, 2250–2273. doi: 10.1002/qj.3790
22. Mikhailova E.N., Polonskiy A.B., Shokurova I.G. On the relationship between the intensity of circulation in the Black Sea and the vorticity of the wind field. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2013, 12, 193–203.
23. Shokurov M.V., Shokurova I.G. Wind stress curl over the Black Sea under different wind regimes. *Physical Oceanography*. 2017, 6, 12–23. doi: 10.22449/1573-160X-2017-6-12-23
24. Lebedev S. Climatic variability of water circulation in the Caspian Sea based on satellite altimetry data. *International Journal of Remote Sensing*. 2018, 39, 13, 4343–4359. doi: 10.1080/01431161.2018.1441567
25. Averyanova E.A., Gubarev A.V., Polonsky A.B. On the spatio-temporal variability and trends in the vorticity of the tangential stress of wind friction in the Black Sea. *Environmental Control Systems*. 2020, 1, 21–36 (in Russian).
26. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / *Cambridge University Press*. In Press.
27. Hare S.R., Mantua N.J. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography*. 2000, 47 (2–4), 103–145. doi: 10.1016/S0079-6611(00)00033-1

28. Bond N.A., Overland J.E., Spillane M., Stabeno P. Recent shifts in the state of the North Pacific. *Geophysical Research Letters*. 2003, 30 (23). doi: 10.1029/2003GL018597
29. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. On the spatial nonuniformity of some parameters of global variations in the recent climate. *Doklady Earth Sciences*. 2009, 426, 4, 705–709. doi: 10.1134/S1028334X09040436
30. Ding H., Greatbatch R.J., Latif M., Park W., Gerdes R. Hindcast of the 1976/77 and 1998/99 Climate Shifts in the Pacific. *J. Climate*. 2013, 26, 7650–7661. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00626.1
31. Belolipetsky P., Bartsev S., Ivanova Y., Saltykov M. Hidden staircase signal in recent climate dynamic. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2015, 51, 323–330. doi: 10.1007/s13143-015-0081-6
32. Folland C.K., Renwick J.A., Salinger M.J., Mullan A.B. Relative influences of the Interdecadal Pacific Oscillation and ENSO in the South Pacific Convergence Zone. *Geophysical Research Letters*. 2002, 29, 13, 21–1–21–4.
33. Mantua N.J., Hare S.R. The Pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*. 2002, 58, 1, 35–44.
34. Dong B., Dai A. The influence of the interdecadal pacific oscillation on temperature and precipitation over the globe. *Climate Dynamics*. 2015, 45, 2667–2681. doi: 10.1007/s00382-015-2500-x
35. Serykh I.V. Influence of the North Atlantic dipole on climate changes over Eurasia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2016, 48, 012004.
36. 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. doi: 10.1134/S1028334X11060304
37. 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.
38. Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*. 2014, 7, 9, 627–637. doi: 10.1038/ngeo2234
39. Onarheim I.H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea. *Geophysical Research Letters*. 2017, 44, 16, 8387–8395.
40. Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature Climate Change*. 2018, 8, 7, 634–639. doi: 10.1038/s41558-018-0205-y
41. Volodin E.M. On the mechanism of Arctic climate oscillation with a period of about 15 years according to data of the INM RAS climate model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020, 56, 112–122. doi: 10.1134/S0001433820020140
42. Yakubovich A.N., Yakubovich I.A. Forecasting the impact of climatic changes on the functionality of the transport infrastructure of the permafrost zone in Russia. *Intellect. Innovation. Investments*. 2019, 1, 104–110 (in Russian).