

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369>
УДК 551.583



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 2. Температура почвы, снег, влажность

И.В. Серых^{1,2}, А.В. Толстиков³*

¹ — *Институт океанологии им. П.П. Ширшова 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 верхних 1,5 метров почвы (ТП), толщины и площади снежного покрова (СП), влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр (ВП) и влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности (ВВ) в регионе западной части Российской Арктики (60°–75° с. ш., 30°–85° в. д.) за 1980–2021 гг. Рассматриваемый временной интервал разбит на 2 периода: 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. Вычислены разности между средними значениями исследуемых параметров за эти периоды. Отдельно рассмотрены климатические изменения, произошедшие для зимнего и летнего сезонов, а также для каждого месяца года. С помощью вычисления линейных и квадратичных трендов обнаружен ускоряющийся рост ТП исследуемого региона в 2001–2021 гг. Показано уменьшение толщины СП и существенное сокращение площади СП в ноябре и апреле. Обнаружен рост ВП на юго-западе и востоке исследуемого региона в период 2001–2021 гг., и показано значительное увеличение ВВ западной части Российской Арктики за исследуемый временной интервал. Причем рост ВВ существенно ускорился в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. над акваториями Баренцева, Карского и Белого морей.

Ключевые слова: атлантификация Арктики, Баренцево море, Белое море, влагосодержание почвы, влажность воздуха, Карское море, климатический сдвиг, многолетняя мерзлота, обратные связи, потепление климата, северо-запад России, снежный покров.

Для цитирования: *Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 2. Температура почвы, снег, влажность // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 352–369. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369>.*

Поступила 25.09.2022

После переработки 18.11.2022

Принята 27.11.2022

Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 2. Soil temperature, snow, humidity

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

Based on average monthly data from the re-analysis of NASA MERRA-2 satellite measurements, the paper explores climatic changes in the temperature of the upper 1.5 meters of soil (TS), the thickness and area of the snow cover (SC), the moisture content of the top layer of soil 1 meter thick (SM) and air humidity at a height of 2 meters from the surface (AH) in the western part of the Russian Arctic (60°–75° N, 30°–85° E) for 1980–2021. The time interval considered is divided into two periods: 1980–2000 and 2001–2021. The differences between the average values of the parameters studied for these periods are calculated. The climatic changes that have occurred for the winter and summer seasons, as well as for each month of the year, are considered separately. Calculation of linear and quadratic trends has revealed an accelerating growth in the TS of the region studied in the period 2001–2021. A decrease in the thickness of the SC and a significant reduction in the area of the SC in November and April are shown. An increase in SM was found in the southwest and east of the region studied in the period 2001–2021, and a significant increase in AH in the western part of the Russian Arctic over the time interval studied is shown. Moreover, the growth of AH over the waters of the Barents, Kara and White Seas significantly accelerated in 2001–2021 compared to 1980–2000.

Keywords: air humidity, Arctic atlantification, Barents Sea, climate shift, climate warming, feedbacks, Kara Sea, northwest Russia, permafrost, snow cover, soil moisture content, White Sea.

For Citation: Serykh I.V., Tolstikov A.V. Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 2. Soil temperature, snow, humidity. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 352–369. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369>.

Received 25.09.2022

Revised 18.11.2022

Accepted 27.11.2022

ВВЕДЕНИЕ

В 1-й части статьи [1] показано, что наиболее сильное увеличение температуры приповерхностного слоя воздуха в исследуемом регионе Арктики (60°–75° с. ш., 30°–85° в. д.) отмечается для ноября и апреля, что свидетельствует о произошедшем смещении границ сезонов — более позднем начале зимы и раннем ее завершении. В период 2001–2021 гг. температура быстрее всего росла в акваториях Белого, Баренцева и Карского морей, и этот рост происходил с ускорением. Увеличение количества осадков особенно заметно проявлялось для всего летнего сезона и сентября, а вызванное им поступление пресных вод в моря способствовало распреснению 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. В зимний сезон 2001–2021 гг. в Баренцевом и Карском морях произошло усиление южного ветра, а в летний сезон — усиление западного ветра по сравнению с 1980–2000 гг. Таким образом, за исследуемый временной интервал произошли существенные изменения климата западной части Российской Арктики.

Во 2-й части статьи рассматриваются климатические изменения температуры верхних 1,5 метров почвы, толщины и площади снежного покрова, влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр и влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности в регионе западной части Российской Арктики (60° – 75° с. ш., 30° – 85° в. д.) за 1980–2021 гг.

Изменчивость этих параметров для Арктики играет существенную роль, поскольку в условиях потепления климата происходит деградация грунтов с многолетней мерзлотой [2–8]. Процесс разрушения криолитозоны опасен эмиссией парниковых газов, вымыванием органических и неорганических форм биогенных элементов, тяжелых металлов и других потенциальных загрязнителей, содержащихся в почве. Далее эти вещества с постоянными и временными водотоками могут попасть в окраинные моря Северного Ледовитого океана. Растепление мерзлоты вызывает деформацию и разрушение строительных конструкций, включая многочисленные трубопроводы, нефтегазовые сооружения, дороги, другие инфраструктурные объекты, расположенные в Арктике. По данным [9], из-за протаивания и деградации грунтов на нефтяных месторождениях Западной Сибири в среднем происходит около 7400 аварий в год, в том числе порядка 1900 — только в Ханты-Мансийском автономном округе.

В последние годы в Арктике отмечается изменение толщины снежного покрова, смещаются сроки его установления и разрушения [10]. Эти процессы влияют на освоение ресурсов в высоких широтах, причем, например, при увеличении толщины снежного покрова может происходить как уменьшение, так и увеличение запаса холода в подстилающей поверхности [11]. Причина этого кроется в разной стратиграфии покрова в силу чередования оттепелей и жидких осадков [11]. Таким образом, различные грунты реагируют на потепление приземной температуры воздуха с разной интенсивностью, и воздействие на многолетнюю мерзлоту в каждом конкретном случае неоднозначно [5]. Поэтому исследования, направленные на изучение динамики многолетней мерзлоты, очень важны.

Цель данной работы: определить климатические изменения температуры почвы, толщины и площади снежного покрова, а также влажности почвы и воздуха в регионе западной части Российской Арктики (60° – 75° с. ш., 30° – 85° в. д.) за период 1980–2021 гг.

ДАнные И МЕТОДИКА

Исследованы среднемесячные данные температуры верхних 1,5 метров почвы, толщины и фракционной площади снежного покрова, влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр и влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности из реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 на сетке $0,5^{\circ}$ ш. \times $0,625^{\circ}$ д. за период 1980–2021 гг. [12].

В качестве граничного форсинга для улучшенной версии модели почвенного компонента MERRA-2 (NASA Catchment Land Surface Model — CLSM) в средних и высоких широтах Северного полушария используются приземные метеорологические поля MERRA-2. В исследовании [13] представлен и оценен весь набор данных, созданный с помощью этой модели, о состоянии многолетней мерзлоты Северного полушария с разрешением 81 км^2 . При этом MERRA-2 использует данные, основанные на наблюдениях, для корректировки спутниковой информации о выпадающих осадках [14].

Толщина снежного покрова в данных MERRA-2 регистрируется как толщина снега в пределах заснеженной части [15]. Когда снег падает на ранее свободный от него тайл

(тайл — это вычислительная единица модели; несколько тайлов составляют ячейку сетки), он накапливается до тех пор, пока его масса на единицу площади в заснеженной части ячейки не составит 26 кг/м^2 . Этот порог известен в модели как минимальная масса снега в доле заснеженной площади и применяется для защиты от очень тонких слоев твердых осадков, которые будут численно нестабильными. По мере накопления снега заснеженная площадь увеличивается, но его масса в пределах заснеженной доли остается постоянной на уровне 26 кг/м^2 . Постепенно расширение этой площади приводит к превышению порога 26 кг/м^2 . В выходных данных MERRA-2 представлены толщина снежного покрова (в метрах) и масса снега (в кг/м^2). В данной работе в качестве исследуемого параметра выбрана толщина снежного покрова, поскольку она оказывает влияние на промерзание почвы в зимний период.

Данные о влажности почвы доступны в MERRA-2 в двух различных единицах измерения [16]. Первая — в безразмерных единицах относительной насыщенности для различных глубин слоя. Значение 1 указывает на полностью насыщенную почву, а значение 0 указывает на полностью обезвоженную почву. Вторая — это содержание влаги в почве в объемных единицах $\text{м}^3/\text{м}^3$, т. е. объем воды в объеме грунта (включая весь твердый материал, воду и воздух). В обоих случаях переменные влажности почвы предоставляются для верхнего слоя 0–100 см. В работе [17] представлена система усвоения данных о Земле и атмосфере, используемая в модели Глобальной системы наблюдения за Землей НАСА (NASA's Global Earth Observing System model), которая применяется в MERRA-2 для усвоения спутниковых данных о влажности почвы.

В исследовании [18] круговорот воды в MERRA-2 сравнивается с современными реанализами и данными наблюдений. MERRA-2 включает параметры, направленные на минимизацию ложных глобальных вариаций, связанных с неоднородностью в наблюдениях. Хотя можно выявить некоторые систематические региональные отклонения, MERRA-2 производит согласованные временные ряды общего количества воды в столбе атмосферы и переноса воды из океана на сушу. Однако на межгодовую изменчивость испарения океана влияет меняющаяся система наблюдений за приземным ветром, а изменчивость осадков тесно связана с испарением. На баланс поверхностной энергии также сильно влияет межгодовая изменчивость испарения океана. Кроме того, оценка температуры и водяного пара показывает, что взаимосвязи водяного пара с температурой слабее в MERRA-2, чем в определяемых наблюдениями атмосферных моделях или реанализах без ассимиляции водяного пара.

В каждом узле сетки исследуемых данных рассчитан средний годовой ход за период 1980–2021 гг. Затем этот средний годовой ход в каждом узле сетки вычитался из данных для получения среднемесячных аномалий относительно среднего годового хода (далее — просто аномалии). По исследуемым данным для региона западной части Российской Арктики ($60^\circ\text{--}75^\circ \text{ с. ш.}$, $30^\circ\text{--}85^\circ \text{ в. д.}$) 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).

Средние значения и разности между 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. позволяют оценить изменения исследуемых климатических параметров, произошедшие между этими временными периодами, а линейные и квадратичные тренды дают возможность оценить изменения, произошедшие внутри самих этих периодов. Таким образом, можно достаточно подробно исследовать пространственные и временные особенности изменений анализируемых гидрометеорологических параметров западной части Российской Арктики за 1980–2021 гг.

Выбор временной границы 2000/2001 гг. между периодами подробно обоснован в 1-й части статьи [1]. Дополнительно к написанному в [1] можно добавить, что исследуемый временной интервал 1980–2021 гг. разбит на периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. также исходя из того, что на рубеже XX и XXI веков произошел переход климатической системы западной части Российской Арктики в новое фазовое состояние [19]. Этот переход может быть связан с климатическим сдвигом в Северной Атлантике [20, 21] и Тихом океане [22, 23], послужившим триггером начала изменений в Арктике, которые затем усилились за счет региональных положительных обратных связей. Следует подчеркнуть, что этот переход не произошел за один год, а продолжался 5–10 лет, приблизительно с 1998 по 2007 г. Есть основания предположить, что данный климатический сдвиг начался в 1998 г. после одного из сильнейших за всю историю наблюдений события Эль-Ниньо 1997–1998 гг., за которым во второй половине 1998 г. последовало одно из самых заметных и продолжительных событий Ла-Нинья 1998–2000 гг. Это сильнейшее по амплитуде межгодовое колебание климата оказало глобальное влияние и могло послужить импульсом для перехода климатической системы Арктики из одного состояния в другое. Одной из причин этого является то, что при событиях Эль-Ниньо происходит понижение температуры Баренцева, Белого и Карского морей, а при событиях Ла-Нинья — повышение температуры в этих морях [24–27].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены средние значения температуры верхних 1,5 м почвы (ТП) за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. Поскольку глубина слоя сезонного промерзания-оттаивания в исследуемом регионе составляет верхние 1,4–2,4 м почвы, то по средним значениям ТП можно предположить наличие либо отсутствие многолетней мерзлоты в данной ячейке сетки MERRA-2 размером 0,5° ш. × 0,625° д. Так, при среднегодовой ТП выше приблизительно +3 °С (желто-красные цвета) существование многолетней мерзлоты практически полностью исключено. При среднегодовой ТП приблизительно от +3 °С до 0 °С (зеленый цвет) возможно образование островной и прерывистой многолетней мерзлоты. При среднегодовой ТП меньше 0 °С (голубой и фиолетовый цвета) многолетняя мерзлота становится непрерывной, т. е. занимает более 90 % площади почвы. Однако следует принять во внимание, что на существование и тип многолетней мерзлоты кроме ТП влияют также такие параметры, как снежный покров, тип почвы, затененность, раститель-

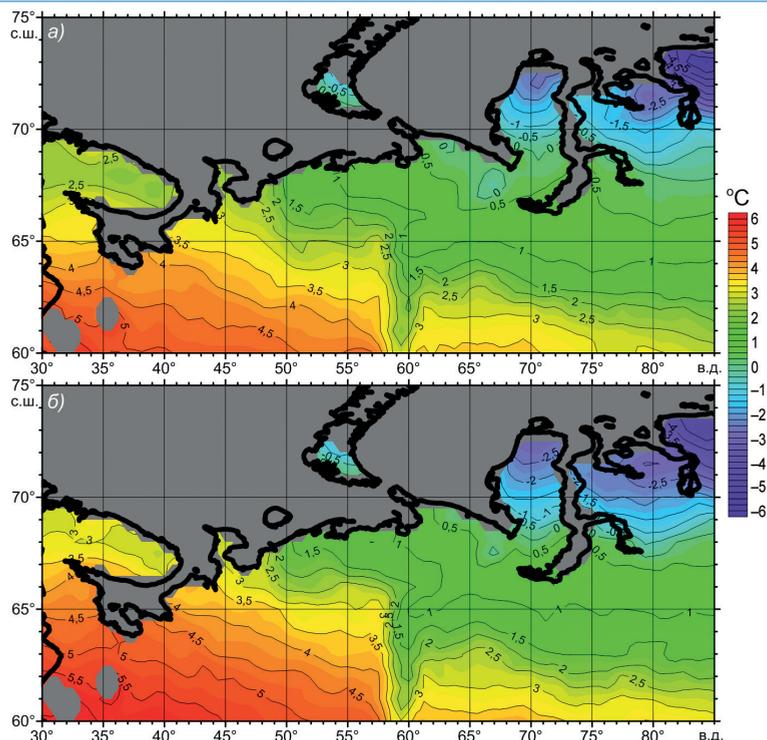


Рис. 1. Средние значения температуры верхних 1,5 м почвы за периоды 1980–2000 гг. (а) и 2001–2021 гг. (б) по данным MERRA-2

Fig. 1. Average temperatures of the upper 1.5 m of soil for the periods 1980–2000 (a) and 2001–2021 (b) according to MERRA-2 data

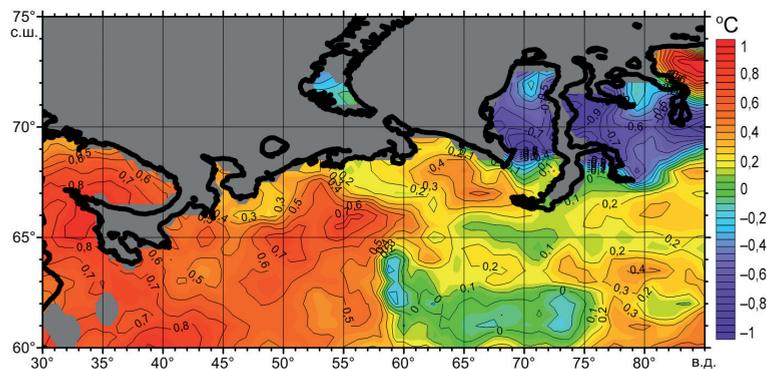


Рис. 2. Средние изменения температуры верхних 1,5 м почвы между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) по данным MERRA-2

Fig. 2. Average changes in temperature of the top 1.5 meters of soil between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) according to MERRA-2 data

ность, влажность почвы, наличие водоемов и др. Тем не менее средние значения ТП, наряду со снежным покровом, изменения которого будут рассмотрены ниже, являются факторами, во многом определяющими вероятность существования многолетней мерзлоты в ячейке сетки MERRA-2.

По рис. 1 и 2 можно оценить изменения средних значений ТП, произошедшие между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. Видно, что ТП выросла более чем на 0,5 °C на западе исследуемого региона (рис. 2, оранжевый и красный цвета). Это может привести к сокращению и даже полному исчезновению островной многолетней мерзлоты на Кольском полуострове, где средняя ТП в 2001–2021 гг. практически всюду выросла и стала превышать +3 °C (рис. 1б). В центре и юго-востоке исследуемого региона преобладает незначительное увеличение ТП, но существенных изменений ТП не наблюдается (желтый, зеленый и голубой цвета). Возможно, что в этих районах рост количества тепла, поступающего из атмосферы, тратится моделью MERRA-2 на процесс таяния островной и прерывистой многолетней мерзлоты. И есть основания предположить, что рост ТП начнется после фазового перехода воды, содержащейся в верхнем слое почвы, из замерзшего в жидкое состояние. Интересным, на наш взгляд, обнаруженным результатом явилось заметное понижение средней ТП (на 0,5–1,0 °C) в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. на северо-востоке западной части Российской Арктики (рис. 2, фиолетовый цвет). Рассмотрим это понижение ТП более подробно.

Поля линейных и квадратичных трендов изменений ТП за 2001–2021 гг. (рис. 3) демонстрируют, что в 2001–2021 гг. практически на всей западной части Российской

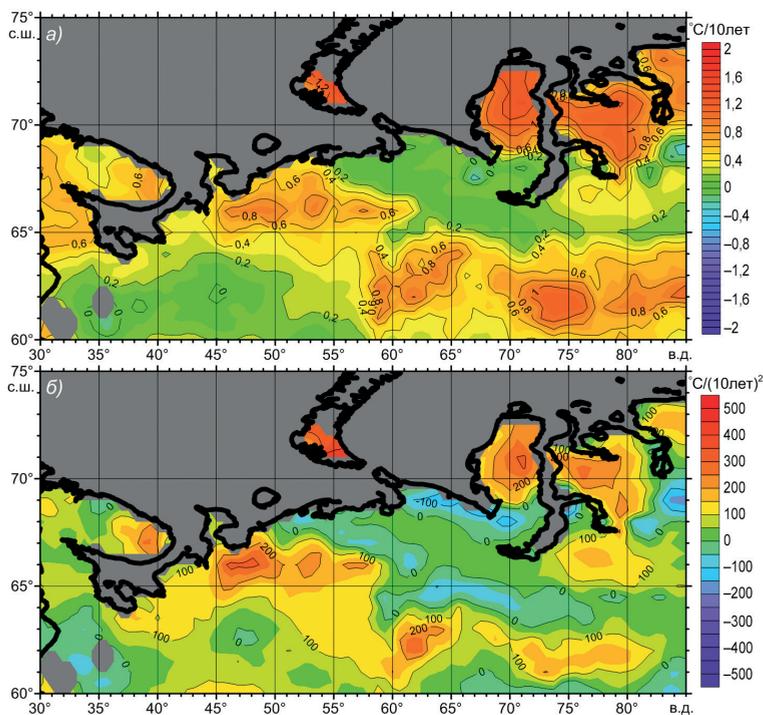


Рис. 3. Средняя скорость (линейный тренд) (а) и ускорение (квадратичный тренд) (б) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) температуры верхних 1,5 м почвы (°C за 10 лет), оцененные с помощью приближения полиномами 1-й и 2-й степени соответственно, за период 2001–2021 гг. по данным MERRA-2

Fig. 3. Average speed (linear trend) (a) and acceleration (quadratic trend) (b) of changes in average monthly anomalies (relative to the annual variation) in the temperature of the upper 1.5 meters of soil (°C for 10 years), estimated using approximation by polynomials of the 1st and 2nd degrees, respectively, for the period 2001–2021 according to MERRA-2

Арктики наблюдался рост ТП (рис. 3а), и происходил он в основном с положительным ускорением (рис. 3б). Причем на северо-востоке исследуемого региона значения линейного и квадратичного трендов изменений ТП в 2001–2021 гг. являются самыми высокими. То есть на северо-востоке исследуемого региона ТП заметно выросла в 2001–2021 гг., а ветви парабол, которыми приближены изменения ТП, в этом районе довольно круто направлены вверх. Поскольку в 2001–2021 гг. на северо-востоке исследуемого региона наблюдался ускоренный рост ТП (рис. 3), а средняя ТП за 2001–2021 гг. в этом районе ниже, чем за 1980–2000 гг. (рис. 2), то можно предположить, что в 1980–2000 гг. в этом районе происходило существенное понижение ТП.

Изменения ТП на северо-востоке (67° – 72° с. ш.; 68° – 85° в. д.) западной части Российской Арктики представлены на графике рис. 4а, где видно, что понижение ТП в этом районе произошло в 1980–2000 гг., а в 2001–2021 гг. наблюдается ее рост. Указанное выше понижение ТП в 1980–2000 гг. может быть связано с сокращением толщины снежного покрова (ТСП) (рис. 4б) и, как следствие, с более сильным выхолаживанием верхнего слоя почвы в зимний сезон. В свою очередь, рост средней ТП в районе (67° – 72° с. ш.; 68° – 85° в. д.) в 2001–2021 гг. (рис. 4а) может быть связан с увеличением температуры воздуха в летний сезон в этот период, который был обнаружен ранее и показан нами в 1-й части статьи [1], при этом ТСП за 2001–2021 гг. в этом районе существенно не изменилась и даже немного увеличилась (рис. 4б).

Таким образом, обнаруженные крупномасштабные изменения ТП западной части Российской Арктики могли быть вызваны изменениями как температуры воздуха у поверхности (ТВП), так и изменениями снежного покрова. Изменения ТВП западной части Российской Арктики за 1980–2021 гг. исследованы раньше и представлены в 1-й части статьи [1]. По рис. 5 можно оценить изменения толщины снежного покрова, произошедшие между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. Видно, что в центре исследуемого региона и, в особенности, в районе Уральских

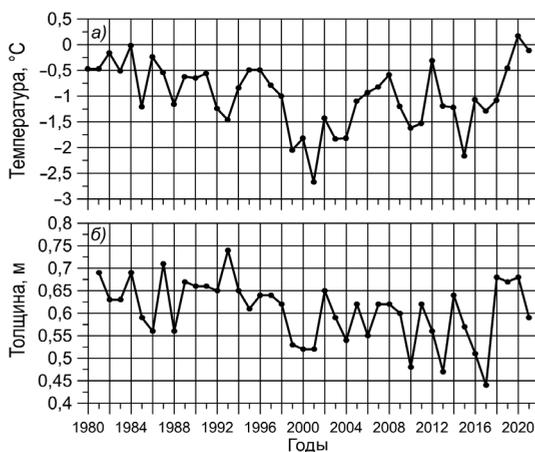


Рис. 4. Изменения среднегодовых значений температуры верхних 1,5 м почвы (а) и толщины снежного покрова за ноябрь–апрель (б), осредненных для северо-востока западной части Российской Арктики (67° – 72° с. ш.; 68° – 85° в. д.)

Fig. 4. Changes in the average annual temperature of the upper 1.5 meters of soil (a) and the snow depth for November–April (b) averaged for the northeast of the western part of the Russian Arctic (67° – 72° N; 68° – 85° E).

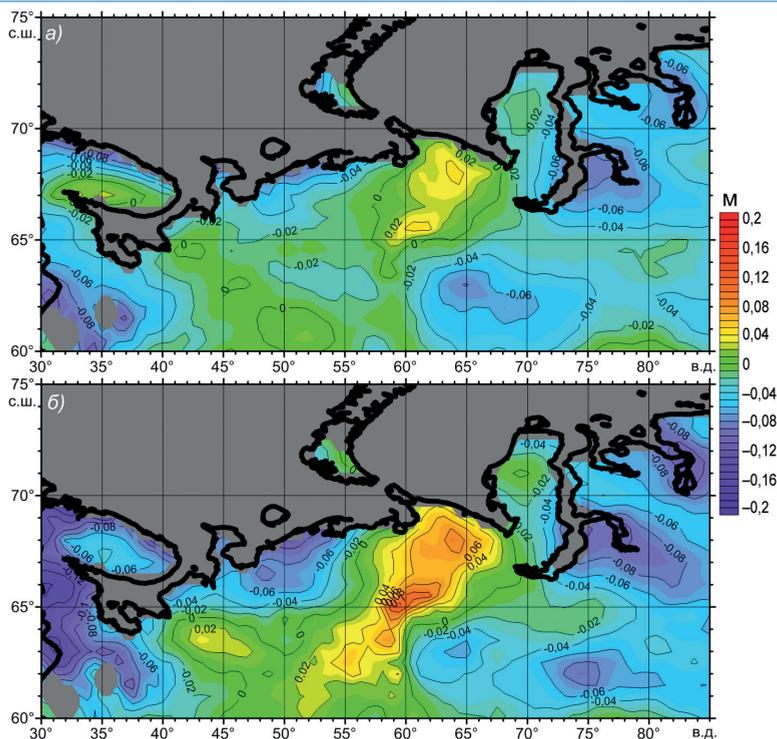


Рис. 5. Средние изменения толщины снежного покрова (метры) между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для зимнего сезона (декабрь–февраль) (а) и апреля (б) по данным MERRA-2

Fig. 5. Average changes in snow cover thickness (meters) between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) for the winter season (December–February) (a) and April (b) according to MERRA-2.

гор ТСП увеличилась, а на западе и востоке исследуемого региона — уменьшилась за 1980–2021 гг. Уменьшение ТСП на северо-востоке в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. (рис. 5) могло стать одной из причин описанного выше уменьшения ТП в этом районе. Зимой снег здесь играет роль теплоизолятора между очень холодным воздухом у поверхности и верхним слоем почвы, поэтому при сокращении ТСП верхний слой почвы на северо-востоке западной части Российской Арктики теряет больше тепла.

Уменьшение ТСП зимой в 1980–2021 гг. также наблюдается на западе исследуемого региона, за исключением юга Кольского полуострова. Особенно заметно уменьшение ТСП на западе исследуемого региона в апреле (рис. 5б), что, по всей видимости, стало следствием более раннего начала таяния снега в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. Это произошло из-за повышения ТВП западной части Российской Арктики, наиболее проявившегося в ноябре и апреле [1]. Характерно, что для апреля (рис. 5б) на юге Кольского полуострова не наблюдается положительных аномалий ТСП, которые заметны для зимнего сезона (рис. 5а). По всей видимости, это может быть связано с более ранним началом таяния снега на юге Кольского полуострова в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг.

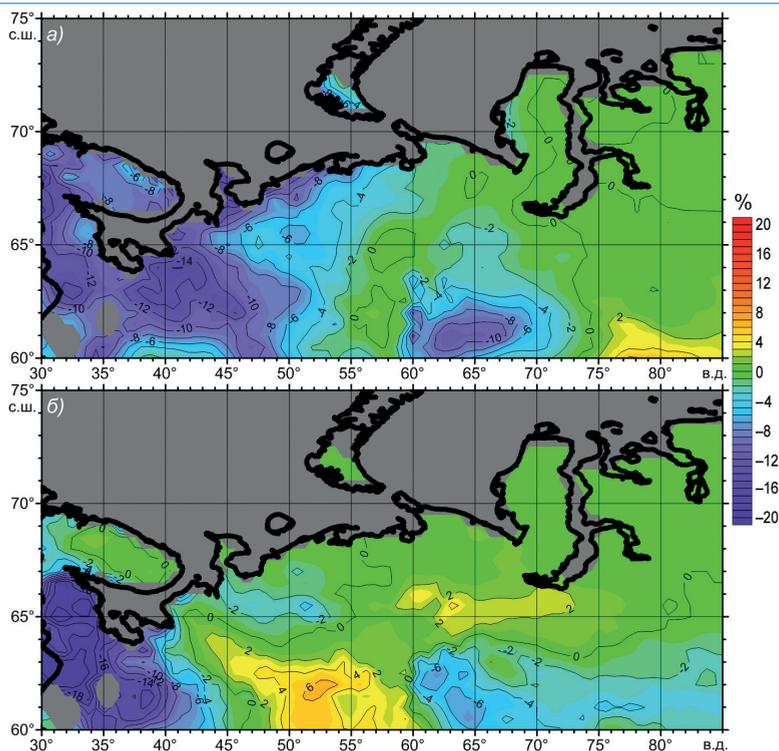


Рис. 6. Средние изменения фракционной площади снежного покрова между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для ноября (а) и апреля (б) по данным MERRA-2.

Fig. 6. Average changes in the fractional area of snow cover between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) for November (a) and April (b) according to MERRA-2 data.

Помимо уменьшения ТСП на западе исследуемого региона в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг., произошло существенное сокращение площади снежного покрова (ПСП) в ноябре и апреле (рис. 6). Можно сделать вывод, что на западе исследуемого региона сократилась продолжительность снежного сезона, что привело к уменьшению отражательной способности поверхности, ее более быстрому нагреву солнечной радиацией и запуску альбедных положительных обратных связей между сокращением ПСП и повышением ТП и ТВП. Эта положительная обратная связь могла стать одной из причин наблюдаемого ускоряющегося роста температуры западной части Российской Арктики в исследуемый период.

Более раннее начало таяния снега в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. могло повлиять на изменение влагосодержания верхнего слоя почвы (ВП) (рис. 7). Поскольку ТСП на западе исследуемого региона уменьшилась (рис. 5), то и количество влаги, попадающей в почву при таянии снега, должно было стать меньше, что выразилось в понижении ВП на юго-западе региона в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. (рис. 7а). Тем не менее, помимо снега, на ВП влияют еще и жидкие осадки, изменение которых было рассмотрено в 1-й части статьи [1], где показано увеличение количества осадков на западе исследуемого региона в 2001–2021 гг.,

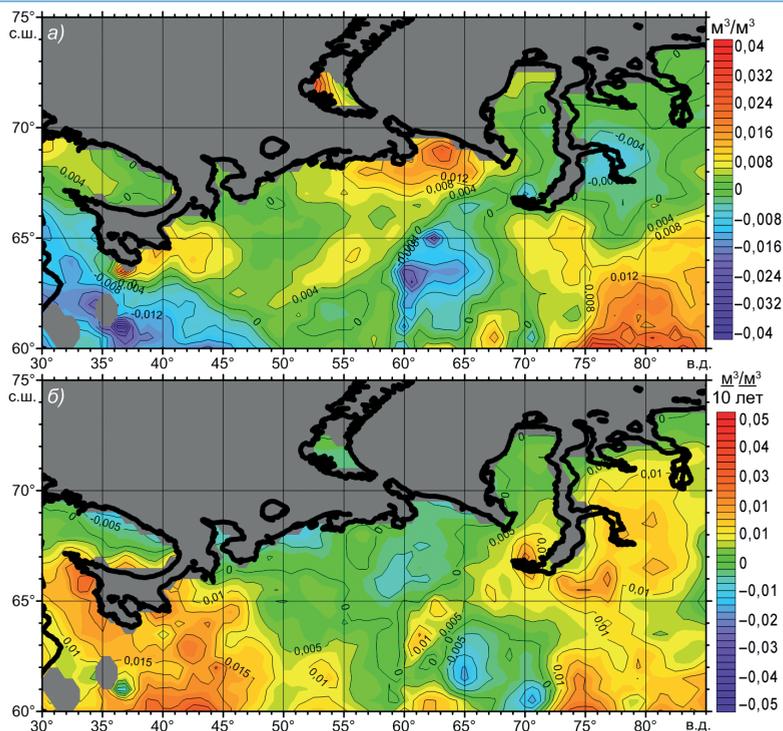


Рис. 7. Средние изменения влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 м между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) (а) и средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 м ($\text{м}^3/\text{м}^3$ за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-й степени (1-я производная), за период 2000–2021 гг. (б) по данным MERRA-2

Fig. 7. Average changes in the moisture content of the top layer of soil 1 meter thick between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference between the average values between these periods) (a), and the average rate (linear trend) of changes in monthly average anomalies (relative to the annual variation) in the moisture content of the top layer of soil 1 meter thick (m^3/m^3 over 10 years), estimated using the approximation by polynomials 1st degree (1st derivative), for the period 2000–2021 (b) according to MERRA-2 data.

вследствие чего в этот период наблюдается рост ВП практически на всей территории западной части Российской Арктики (рис. 7б).

Рост количества осадков и температуры в 1980–2021 гг. повлиял на увеличение влажности воздуха (ВВ) в западной части Российской Арктики (рис. 8). Видно, что ВВ выросла заметнее всего над акваториями Белого, Баренцева и Карского морей и меньше всего на юге центральной части исследуемого региона. По всей видимости, увеличение ВВ над акваториями морей связано с усилением испарения с их поверхности вследствие роста температуры поверхности воды и сокращения площади морского льда. Также на рост испарения могло повлиять увеличение модуля скорости ветра у поверхности Баренцева и Карского морей, показанное в 1-й части статьи [1].

Рост ВВ начался на западе исследуемого региона, в особенности над акваторией Белого моря, в 1980–2000 гг. (рис. 9а). В 2001–2021 гг. увеличение ВВ распростра-

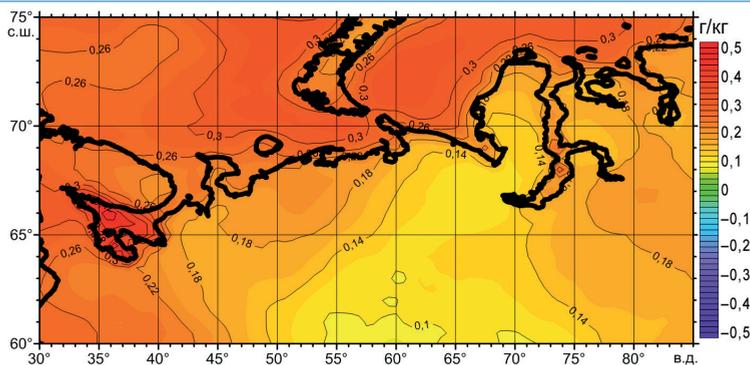


Рис. 8. Средние изменения удельной влажности воздуха на высоте 2 м от поверхности (г/кг за 10 лет) между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) по данным MERRA-2

Fig. 8. Average changes in specific air humidity at a height of 2 meters from the surface (g/kg over 10 years) between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) according to MERRA-2 data.

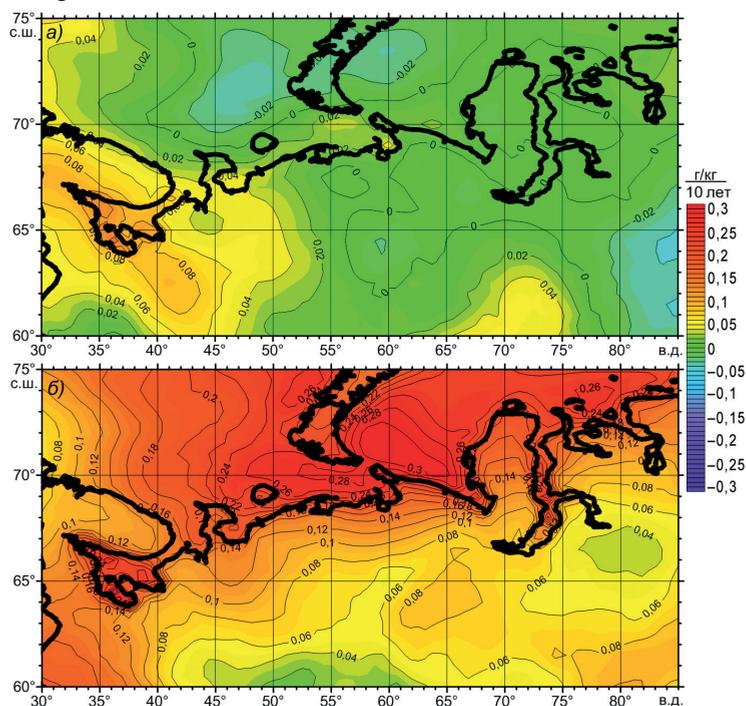


Рис. 9. Средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) удельной влажности воздуха на высоте 2 м от поверхности (г/кг за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-й степени (1-я производная), за периоды 1980–2000 гг. (а) и 2001–2021 гг. (б) по данным MERRA-2

Fig. 9. The average rate (linear trend) of changes in monthly average anomalies (relative to the annual variation) in specific air humidity at a height of 2 meters from the surface (g/kg over 10 years), estimated using the approximation by polynomials of the 1st degree (1st derivative), for the periods 1980–2000 (a) and 2001–2021 (b) according to MERRA-2 data

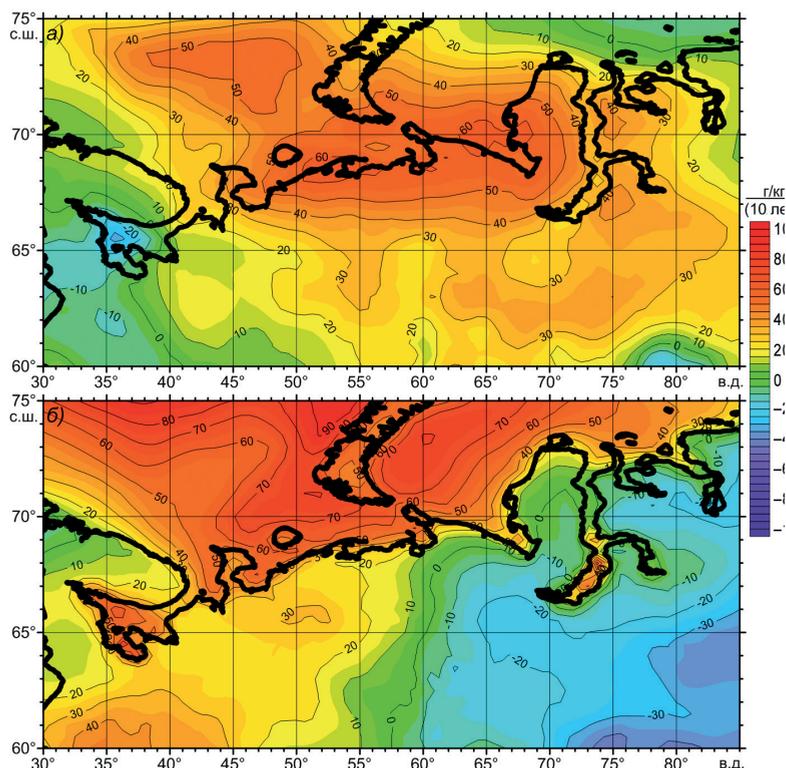


Рис. 10. Среднее ускорение (квадратичный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) удельной влажности воздуха на высоте 2 м от поверхности (г/кг за $(10 \text{ лет})^2$), оцененное с помощью приближения полиномами 2-й степени (2-я производная), за периоды 1980–2000 гг. (а) и 2001–2021 гг. (б) по данным MERRA-2

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

нилось на центр и восток исследуемого региона с наибольшей скоростью роста над акваториями Баренцева, Белого и Карского морей (рис. 9б). Причем рост ВВ над акваториями этих морей в 2001–2021 гг. происходил со значительным положительным ускорением (рис. 10). Таким образом, наблюдаемые в западной части Российской Арктики процессы повышения ТП и ВВ распространяются с запада на восток и могут являться следствием усиливающегося влияния Северной Атлантики на исследуемый регион. Данный процесс ускоряющегося роста температуры и влажности западной части Российской Арктики можно назвать термином «атлантификация» этого региона, который изначально был введен для обозначения изменений физических свойств верхнего слоя воды приатлантической части Северного Ледовитого океана [28, 29].

Повышение удельной ВВ (содержания воды в атмосфере) увеличило количество водяного пара, который является одним из парниковых газов. Это способствовало усилению нисходящей (отраженной) длинноволновой радиации, что, в свою очередь, повышает температуру, испарение и, как следствие, влагосодержание атмосферы.

Таким образом, усилилась обратная положительная связь между ВВ и температурой, влияющая на потепление западной части Российской Арктики. Однако следует принять во внимание, что из-за повышения температуры поверхности увеличилась и длинноволновая уходящая радиация, что в некоторой степени компенсирует влияние увеличения ВВ на рост температуры.

Вследствие обнаруженного по данным MERRA-2 увеличения температуры и влажности воздуха в нижнем слое тропосферы западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. произошло увеличение теплосодержания этого слоя. Поскольку тепловая энергия, содержащаяся в атмосфере, оказывает влияние на амплитуду, частоту и продолжительность экстремальных погодных явлений, то можно предположить, что в западной части Российской Арктики должны происходить изменения таких событий. Таким образом, анализ изменений амплитуды, частоты и продолжительности экстремальных погодных явлений западной части Российской Арктики требует дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

1. Обнаружено повышение температуры верхних 1,5 м почвы (ТП) приблизительно на 0,5 °С в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. на западе исследуемого региона. Это может привести к сокращению и даже полному исчезновению островной многолетней мерзлоты на Кольском полуострове, где средняя ТП в 2001–2021 гг. практически всюду выросла и стала превышать +3 °С. В 2001–2021 гг. начался ускоряющийся рост ТП также и на северо-востоке западной части Российской Арктики. Таким образом, в настоящее время на большей части исследуемого региона наблюдается ускоряющийся рост ТП, что может вызвать таяние многолетней мерзлоты.

2. Показано сокращение толщины снежного покрова на западе и востоке исследуемого региона в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. На западе исследуемого региона также произошло существенное сокращение площади снежного покрова в ноябре и апреле. Из-за этого усилилась альбедная обратная положительная связь между температурой и свободной от снега поверхностью, что могло явиться одной из причин сокращения длительности зимнего сезона в западной части Российской Арктики.

3. Рост удельной влажности воздуха на высоте 2 м от поверхности (ВВ) начался на западе исследуемого региона и в особенности над акваторией Белого моря в 1980–2000 гг. В 2001–2021 гг. увеличение ВВ распространилось на центр и восток исследуемого региона, с наибольшей скоростью роста над акваториями морей, причем рост ВВ происходил с положительным ускорением. Вероятно, увеличение ВВ над акваториями Белого, Баренцева и Карского морей связано с усилением испарения с их поверхностей вследствие роста температуры поверхности воды и сокращения площади морского льда. Дополнительно к росту ВВ в 2001–2021 гг. на западе и востоке исследуемого региона наблюдался рост влагосодержания почвы.

4. Исследованная пространственно-временная динамика роста температуры и влажности западной части Российской Арктики имеет тенденцию распространения с запада на восток, что можно объяснить усилением влияния Северной Атлантики на исследуемый регион. Данный процесс можно назвать «атлантификацией» климата западной части Российской Арктики. Увеличение температуры и влажности воздуха исследуемого региона привело к росту теплосодержания нижнего слоя атмосферы —

увеличению его тепловой энергии. Вследствие этого можно ожидать увеличения количества, силы и продолжительности экстремальных погодных явлений в западной части Российской Арктики.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2021-0003 «Крупномасштабные, волновые и вихревые океанские процессы и роль океана в формировании климата: междекадная эволюция циркуляции, гидрофизических полей океана и потоков на границе океан–атмосфера в условиях меняющегося климата».

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The research was funded within the federal assignment to the Shirshov Institute of Oceanology RAS on topic No. FMWE-2021-0003 “Large-scale, wave and eddy ocean processes and the role of the ocean in climate formation: interdecadal evolution of circulation, ocean hydrophysical fields and flows at the ocean-atmosphere boundary in a changing climate”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277.
2. Шерстюков А.Б. Многолетняя мерзлота России в условиях глобального потепления климата // Эволюция и динамика экосистем. 2007. № 4. С. 8–11.
3. Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Мяс Л.Т., Павлов А.В., Романовский В.А., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И. Континентальная многолетняя мерзлота. Глава 8 // Методы изучения последствий изменений климата для природных систем / Под ред. С.М. Семенова. М.: ВНИИГМИ, 2010. С. 301–359.
4. Анисимов О.А., Шерстюков А.Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. 22 (2). С. 90–99.
5. Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15 (4). С. 15–18.
6. Lemke P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. Chapter 4 // Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. P. 337–383.
7. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2017. URL: <https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-2017/1610> (дата обращения: 30.11.2022).
8. Погожева М.П., Якушев Е.В., Петров И.Н., Яески Е.А. Экспериментальное исследование влияния таяния многолетней мерзлоты на содержание биогенных элементов и тяжелых металлов в морской воде при абразионном разрушении арктических берегов // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 67–75. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-67-75.
9. Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89 (12). С. 1228–1239.

10. Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // Криосфера Земли. 2018. Т. 22 (4). С. 65–75. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75).
11. Сосновский А.В., Чернов П.А. Влияние снежного покрова на охлаждение поверхностного слоя ледника Восточный Грэнфьорд (Шпицберген) // Лед и снег. 2021. Т. 61 (1). С. 75–88. doi: 10.31857/S2076673421010072.
12. 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. V. 30 (14). P. 5419–5454.
13. Tao J., Koster R.D., Reichle R.H., Forman B.A., Xue Y., Chen R.H., Moghaddam M. Permafrost Variability over the Northern Hemisphere Based on the MERRA-2 Reanalysis // Cryo. 2019. V. 13. P. 2087–2110.
14. Reichle R., Liu Q., Koster R., Draper C., Mahanama S., Partyka G. Land Surface Precipitation in MERRA-2 // Journal of Climate. 2017. V. 30 (5). P. 1643–1664.
15. Toure A.M., Reichle R.H., Forman B.A., Getirana A., De Lannoy G.J.M. Assimilation of MODIS Snow Cover Fraction Observations into the NASA Catchment Land Surface Model // Remote Sensing. 2018. V. 10. 316. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10020316> (дата обращения: 30.11.2022).
16. Reichle R.H., Draper C.S., Liu Q., Giroto M., Mahanama S.P.P., Koster R.D., De Lannoy G.J.M. Assessment of MERRA-2 land surface hydrology estimates // Journal of Climate. 2017. V. 30. P. 2937–2960.
17. Draper C., Reichle R.H. Assimilation of satellite soil moisture for improved atmospheric reanalyses // Mon. Wea. Rev. 2019. V. 147. P. 2163–2188.
18. Bosilovich M.G., Robertson F.R., Takacs L., Molod A., Mocko D. Atmospheric Water Balance and Variability in the MERRA-2 Reanalysis // Journal of Climate. 2017. V. 30 (4). P. 1177–1196.
19. 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.
20. 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.
21. Serykh I.V. Influence of the North Atlantic dipole on climate changes over Eurasia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. V. 48. 012004.
22. 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. V. 426. № 4. P. 705–709.
23. 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.
24. Serykh I.V., Kostianoy A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature // Ecologica Montenegrina. 2019. V. 25. P. 1–13.
25. Серых И.В., Толстикова А.В. О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2020. № 4. С. 83–95.
26. Serykh I.V., Tolstikova A.V. On the climatic changes of the surface air temperature in the White Sea region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 606. 012054.

27. *Серых И.В.* О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 329–370.

28. *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. V. 25 (13). P. 4736–4743.

29. *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. V. 356. № 6335. P. 285–291.

REFERENCES

1. *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. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277. [In Russian].

2. *Sherstjukov A.B.* Permafrost of Russia in the context of global warming. *Jevoljucija i dinamika jekosistem*. Evolution and dynamics of ecosystems. 2007, 4: 8–11. [In Russian].

3. *Anisimov O.A., Anohin Ju.A., Lavrov S.A., Malkova G.V., Mjach L.T., Pavlov A.V., Romanovskij V.A., Streleckij D.A., Holodov A.L., Shiklomanov N.I.* Continental permafrost. Chapter 8. *Metody izucheniia posledstviia izmenenii klimata dlja prirodnykh system*. Methods for studying the consequences of climate change for natural systems (edited by S.M. Semenov). M.: VNIIGMI, 2010: 301–359. [In Russian].

4. *Anisimov O.A., Sherstjukov A.B.* Assessment of the role of natural and climatic factors in changes in the permafrost zone of Russia. *Kriosfera Zemli*. Earth's cryosphere. 2016, 22 (2): 90–99. [In Russian].

5. *Konishhev V.N.* Permafrost response to climate warming. *Kriosfera Zemli*. Earth's cryosphere. 2011, 15 (4): 15–18. [In Russian].

6. *Lemke, P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T.* Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. Chapter 4. *Climate Change: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007: 337–383.

7. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2017. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-2017/1610> (accessed 30.11.2022).

8. *Pogojeva M.P., Yakushev E.V., Petrov I.N., Yaeski E.A.* Experimental study of the effect of permafrost melting on the content of biogenic elements and heavy metals in sea water during abrasion destruction of Arctic coasts. *Arktika: jekologija i jekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2021, 11 (1): 67–75. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-67-75. [In Russian].

9. *Porfir'ev B.N., Eliseev D.O., Streletskii D.A.* Economic assessment of the consequences of permafrost degradation to exclude climate change for the sustainability of the road situation in the Russian Arctic. *Vestnik Rossijskoi akademii nauk*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019, 89 (12): 1228–1239. [In Russian].

10. *Popova V.V., Shiriaeva A.V., Morozova P.A.* Changes in Snow Cover Characteristics in Russia in 1950–2013: Regional Peculiarities and Relationship with Global Warming. *Kriosfera Zemli*. Earth's cryosphere. 2018, 22 (4): 65–75. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75). [In Russian].

11. *Sosnovskii A.V., Chernov R.A.* Influence of snow cover on the cooling of the surface layer of the East Grönfjörd Glacier (Svalbard). *Led i Sneg*. Ice and snow. 2021, 61 (1): 75–88. doi: 10.31857/S2076673421010072. [In Russian].

12. 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.
13. Tao J., Koster R.D., Reichle R.H., Forman B.A., Xue Y., Chen R.H., Moghaddam M. Permafrost Variability over the Northern Hemisphere Based on the MERRA-2 Reanalysis. *Cryo*. 2019, 13: 2087–2110.
14. Reichle R., Liu Q., Koster R., Draper C., Mahanama S., Partyka G. Land Surface Precipitation in MERRA-2. *Journal of Climate*. 2017, 30 (5): 1643–1664.
15. Toure A.M., Reichle R.H., Forman B.A., Getirana A., De Lannoy G.J.M. Assimilation of MODIS Snow Cover Fraction Observations into the NASA Catchment Land Surface Model. *Remote Sensing*. 2018, 10, 316. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs10020316> (accessed 30.11.2022).
16. Reichle R.H., Draper C.S., Liu Q., Girotto M., Mahanama S.P.P., Koster R.D., De Lannoy G.J.M. Assessment of MERRA-2 land surface hydrology estimates. *Journal of Climate*. 2017, 30: 2937–2960.
17. Draper C., Reichle R.H. Assimilation of satellite soil moisture for improved atmospheric reanalyses. *Mon. Wea. Rev.* 2019, 147: 2163–2188.
18. Bosilovich M.G., Robertson F.R., Takacs L., Molod A., Mocko D. Atmospheric Water Balance and Variability in the MERRA-2 Reanalysis. *Journal of Climate*. 2017, 30 (4): 1177–1196.
19. Seryh I.V., Kostjanoj A.G., Lebedev S.A., Kostjanaja E.A. On the transition of the temperature regime of the White Sea region to a new phase state. *Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika*. Fundamental and applied hydrophysics. 2022, 15 (1): 98–111. [In Russian].
20. Byshev V.I., Nejman V.G., Romanov Ju.A., Seryh I.V. On the phase variability of some characteristics of the modern climate in the North Atlantic region. *Doklady Akademii nauk (DAN)*. Reports of the Academy of Sciences. 2011, 438 (6): 817–822. [In Russian].
21. Serykh I.V. Influence of the North Atlantic dipole on climate changes over Eurasia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2016, 48: 012004.
22. 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. [In Russian].
23. 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.
24. Serykh I.V., Kostianoy A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature. *Ecologica Montenegrina*. 2019, 25: 1–13.
25. Seryh I.V., Tolstikov A.V. On the causes of long-term variability of near-surface air temperature over the White Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografija*. Bulletin of Moscow University. Ser. 5: Geography. 2020, 4: 83–95. [In Russian].
26. Serykh I.V., Tolstikov A.V. On the climatic changes of the surface air temperature in the White Sea region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, 606: 012054.
27. Seryh I.V. On the role of El Niño — Global Atmospheric Oscillation in the interannual variability of hydrometeorological processes. *Gidrometeorologija i jekologija*. Hydrometeorology and ecology. 2021, 63: 329–370. [In Russian].
28. 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.
29. 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.