

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА РЕК И КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ В РЕГИОНЕ БЕЛОГО МОРЯ

А. В. Толстиков

ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

И. В. Серых

ФГБУН Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН
Геофизический центр РАН (Москва, Российская Федерация)

А. Ф. Балаганский

ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2022 г.

По данным наблюдений и реанализам исследованы климатические изменения и межгодовая изменчивость стока рек, количества осадков, влагосодержания почвы и атмосферы в регионе Белого моря за многолетний период. Обнаружен существенный рост количества осадков с середины 1970-х годов по 2021 г. Показано, что этот рост сильнее всего проявился в районах Кандалакшского и Двинского заливов, а также водосбора Северной Двины. Выдвинута гипотеза, что обнаруженное увеличение осадков может быть связано с усилением влияния Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана на регион Белого моря. Спектральный и вейвлетный анализы выявили колебания исследуемых параметров с периодами 2–4 и 12–14 лет. С помощью кросс-вейвлетного анализа показана связь межгодовой изменчивости количества осадков в регионе Белого моря с Северо-Атлантическим и Арктическим колебаниями.

Ключевые слова: климатические изменения, сток рек, количество осадков, вейвлет-анализ, Белое море.

Введение

Многолетний режим стока рек (водный, тепловой, химический) отражает климатические колебания на исследуемой территории и может использоваться для расчетов характеристик стока на перспективу. Важным дополнением к рядам стока рек, характеризующим изменчивость климата, может стать исследование колебаний режима осадков, однако здесь есть существенные особенности. Если по стоку некоторых рек водосбора Белого моря существуют ряды данных за более чем 100 лет, которые можно оценивать стандартными методами статистики для выявления трендов и квазипериодичности, то наблюдение за осадками за этот период

претерпело серию серьезных изменений, затрудняющих подобный анализ. Так, в XX в. произошли два крупных нарушения однородности в наблюдениях: массовое перемещение метеостанций в 1930 г. на новые места и переход от дождемера с защитой Нифера к осадкомеру Третьякова в 1952–1954 гг. [1]. И хотя существует множество методик пересчета данных, отдельные вопросы согласования рядов осадков, измеренных в первой половине XX в., с рядами более позднего времени решить не удалось. Поэтому по осадкам мы используем ряды с 1956 г., что позволяет корректно согласовывать данные по стоку рек и осадкам.

Среди важных факторов, влияющих на формирование климата Белого моря, наиболее значимы относительная близость Атлантического и Северного Ледо-

витого океанов, а также глубокая врезанность моря в материк, что способствует проявлению некоторых континентальных черт. Белое море внутреннее, и процессы, происходящие над всем его водосбором, проявляются и в климате акватории. Над самим Белым морем и участками суши, непосредственно прилегающими к водоему, климат является переходным от морского полярного на севере к континентальному умеренному на юге. По условиям образования район моря принадлежит к атлантико-арктической зоне умеренного пояса.

Преобладающие в течение года воздушные массы, поступающие с Атлантики, обуславливают теплую продолжительную зиму, прохладное короткое лето, значительную облачность, высокую влажность воздуха, значительное количество осадков, неустойчивые погодные условия во все сезоны. В течение года выражена частая смена воздушных масс, связанная с прохождением барических образований с западным переносом. Для Белого моря отмечается 215 дней с циклонами за год [2]. Влияние Северного Ледовитого океана проявляется в субмеридиональном переносе воздушных масс с севера. Интенсивная циклоническая деятельность, относительно быстрая смена синоптических процессов обуславливают заметную изменчивость значений метеорологических величин. Зимой в климате сильнее сказывается влияние Атлантического океана, летом — материка, в чем проявляется муссонная тенденция.

В качестве объекта исследования рассматривается регион Белого моря — территория, включающая расчетный квадрат в пределах 61—70° с. ш. и 30—46° в. д. Цель работы — выявление квазипериодов и трендов в речном стоке, а также в ходе осадков в регионе Белого моря за многолетний период.

Данные и методика

Данные по стоку рек водосбора Белого моря и осадкам получены через открытые ресурсы Росгидромета: ежегодники, архивы ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/mcd/>), АИС ГМВО (<https://gmvo.sknivh.ru/>), а также приобретены при выполнении различных проектов Института водных проблем Севера (ИВПС) Карельского научного центра РАН, в Карельском центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Северо-Западном, Архангельском и Мурманском управлениях по гидро-

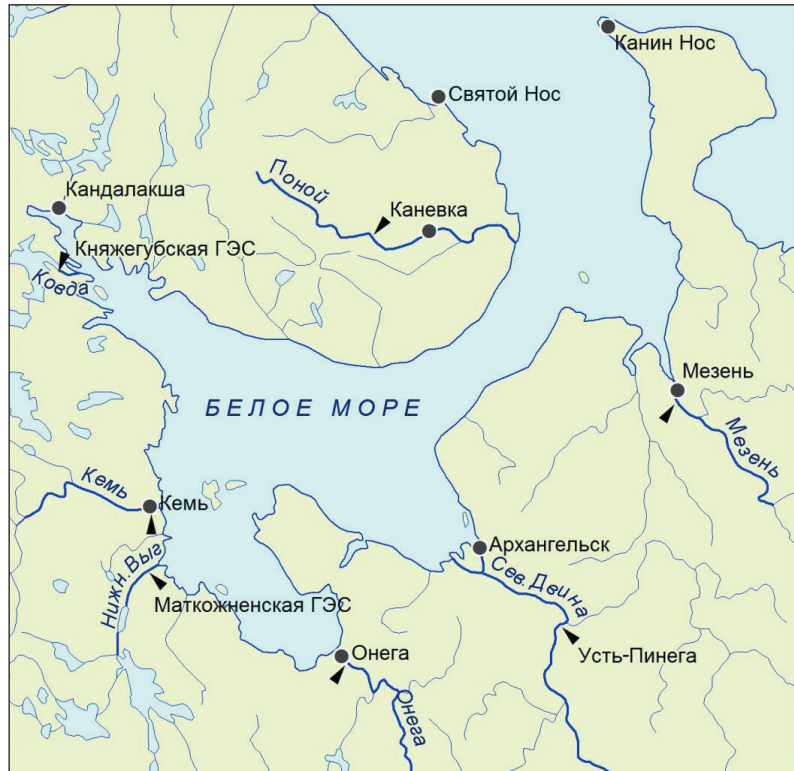


Рис. 1. Схема расположения метеостанций и гидрологических постов, по которым строились вейвлетные распределения. Черные круги — метеостанции, черные треугольники — гидрологические посты

Fig. 1. Location scheme of weather stations and hydrological posts, according to which wavelet distributions were built. Black circles are weather stations, black triangles are hydrological posts

метеорологии и мониторингу окружающей среды. Использованы данные с представленных на рис. 1 гидрологических постов и метеостанций.

Также привлекались материалы открытых ресурсов различных реанализов; среднемесячные данные о количестве осадков из NOAA-CIRES-DOE Twentieth Century Reanalysis V3 (20thC_ReanV3) на сетке $1 \times 1^\circ$ за 1900—2015 гг. [3]; среднемесячные данные о влагосодержании почвы CPC Soil Moisture V2 на сетке $0,5 \times 0,5^\circ$ за 1948—2020 гг. [4]; среднемесячные данные о содержании воды в атмосфере, выпадающей в виде осадков из NCEP/NCAR Reanalysis 1 на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$ за 1948—2020 гг. [5]; среднемесячные данные о количестве осадков за 1948—2021 гг. из NOAA's PRECipitation REConstruction Dataset (PREC) на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$ и из NOAA's PRECipitation REConstruction over Land (PREC/L) (над сушей) на сетке $1 \times 1^\circ$ [6]; среднемесячные данные о количестве осадков из реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 на сетке $0,5^\circ$ ш. \times $0,625^\circ$ д. за 1980—2021 гг. [7]; среднемесячные данные о количестве осадков из реанализа спутниковых измерений GPCP Version 2.3 Combined Precipitation Data Set на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$ за 1979—2020 гг. [8].

По всем исследуемым среднемесячным данным в каждом узле их сетки рассчитан средний годовой

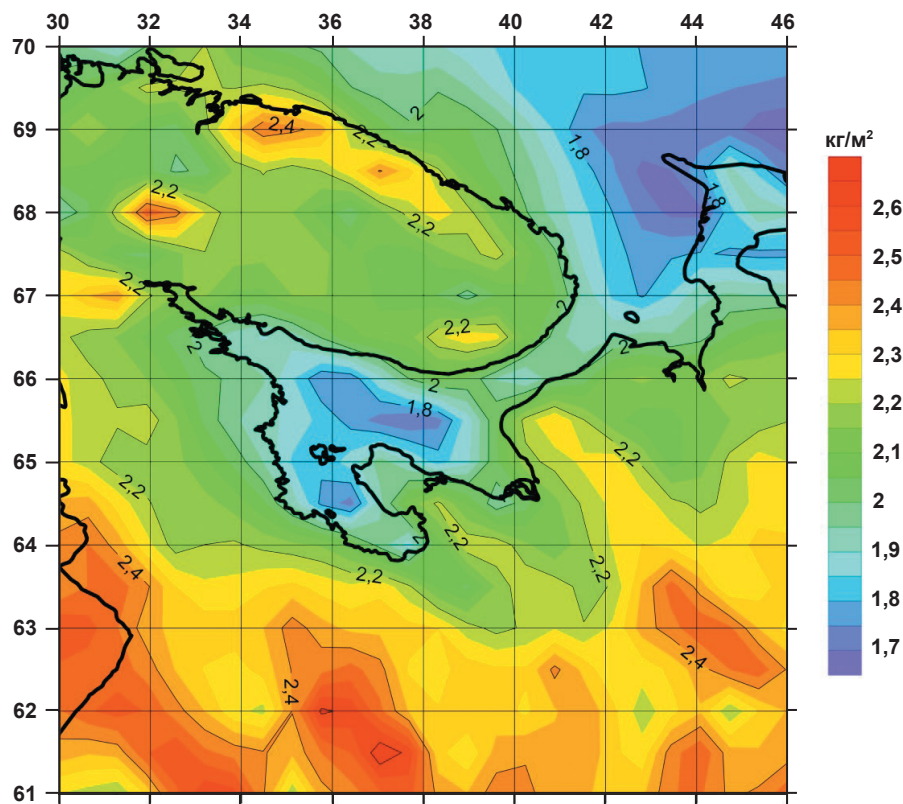


Рис. 2. Поле среднесуточного количества осадков в регионе Белого моря по данным MERRA-2 за 1980–2021 гг., кг/м²
Fig. 2. Field of average daily precipitation in the White Sea region according to MERRA-2 data for the period 1980–2021, kg/m²

ход за рассматриваемые периоды. Затем этот средний годовой ход в каждом узле сетки вычитался из данных для получения среднемесячных аномалий относительно среднего годового хода (далее — просто аномалии).

Производилось осреднение данных по осадкам для региона Белого моря в квадрате 61—70° с. ш., 30—46° в. д. После сравнения перечисленных реанализов для демонстрации результатов осреднения по региону Белого моря был выбран PREC/L, поскольку он хорошо согласован с остальными данными и покрывает достаточно продолжительный временной интервал 1948—2021 гг. [6]. Этот реанализ представляет собой данные осадков только над сушей, что лучше соотносится с исследуемыми данными по стоку рек. Однако, как уже указывалось, по осадкам использовались данные с 1956 г.

Линейные тренды вычислялись методом наименьших квадратов. Применялся фильтр Баттерворта нижних частот. Оценка энергетических спектров производилась с помощью быстрого преобразования Фурье. Вейвлетные преобразования производились с применением вейвлетной функции Морле [9]. Для построения диаграмм вейвлетных кросс-корреляций двух рядов вычислялись произведения их вейвлетных вещественных компонент [10—12].

Среднемесячные значения индекса Северо-Атлантического колебания (САК) за 1950—2021 гг. взя-

ты из NOAA Climate Prediction Center North Atlantic Oscillation Index (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>) [13]. Среднемесячные значения индекса Арктического колебания (АК) за 1950—2021 гг. взяты из NOAA Climate Prediction Center Arctic Oscillation Index (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml) [14].

Результаты и обсуждение

Количество выпадающих осадков распределено неравномерно по исследуемому региону (рис. 2). Так, над акваторией Белого моря осадков выпадает меньше, чем над сушей. На севере и в центральной части рассматриваемого региона осадков выпадает меньше, чем на юге, за исключением некоторых районов, где рельеф местности этому способствует. Поле, представленное на рис. 2, рассчитано по данным MERRA-2 за период спутниковых наблюдений (1980—2021 гг.), поскольку эти данные обладают высоким разрешением и однородностью.

Изменения количества осадков за период спутниковых наблюдений (1980—2021 гг.), оцененные с помощью линейного приближения (тренда), также распределены неравномерно в регионе Белого моря (рис. 3). Так, на северо-востоке и юго-западе рассматриваемого региона наблюдается понижение среднесуточного количества осадков — при-

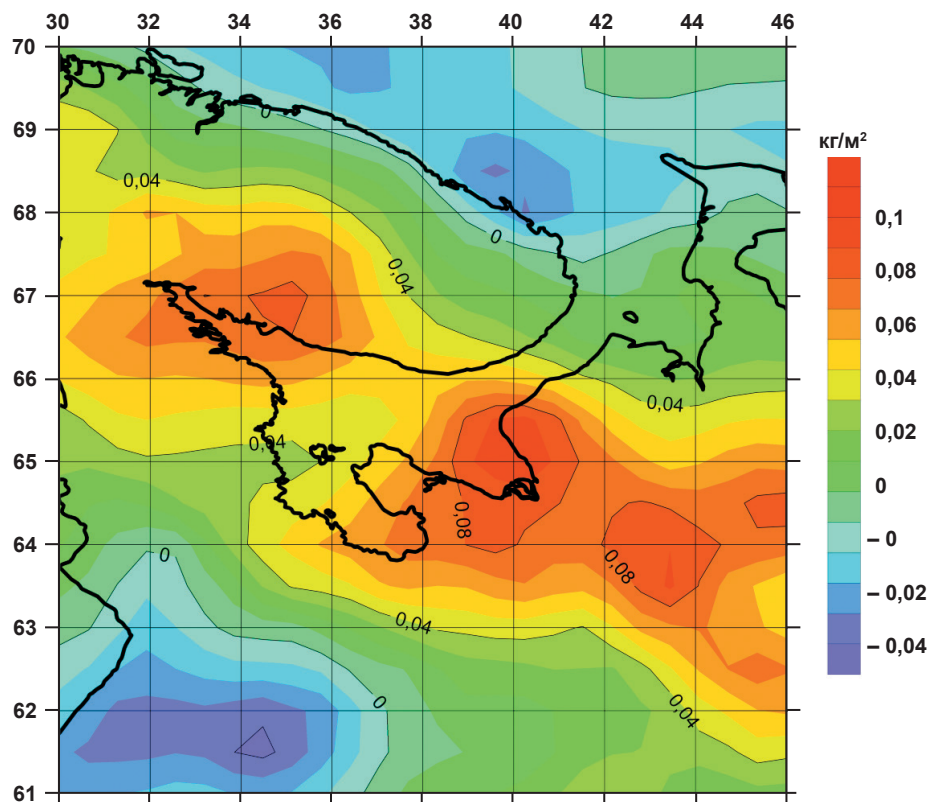


Рис. 3. Поле средних изменений аномалий среднесуточного количества осадков за 10 лет в регионе Белого моря, оцененное с помощью линейных трендов по данным MERRA-2 за 1980–2021 гг.

Fig. 3. Field of average changes in the anomalies of the average daily precipitation over 10 years in the White Sea region, estimated using linear trends according to MERRA-2 data for the period 1980–2021

близительно $-0,02 \text{ кг/м}^2$ в среднем за 10 лет, что за рассматриваемые 42 года составило примерно $-0,08 \text{ кг/м}^2$. Но это понижение в несколько раз меньше по абсолютной величине, чем увеличение осадков в центральной части исследуемого региона — приблизительно $+0,06 \text{ кг/м}^2$ в среднем за 10 лет, что за 42 года составило приблизительно $+0,25 \text{ кг/м}^2$. Благодаря этому за 1980—2021 гг. в среднем по региону наблюдается увеличение количества осадков. Сильнее всего за 1980—2021 гг. количество осадков выросло в районах Кандалакшского и Двинского заливов, а также в районе водосбора Северной Двины. Однако следует принять во внимание, что эта оценка произведена по линейному приближению произошедших изменений. А примененный при этом метод наименьших квадратов чувствителен к краевым значениям, которые зависят от межгодовой изменчивости.

Результаты изменения количества осадков, влагосодержания почвы и атмосферы в регионе Белого моря, полученные по данным реанализов, сравнивались со значениями осадков с метеостанций Архангельск, Онега, Мезень, Кандалакша, Каневка, Канин Нос, Святой Нос за 1961—2018 гг. Это сравнение показало их высокое взаимное соответствие, что объясняется усвоением данных с метеостанций в реанализах. Но временные ряды метеостан-

ций являются сильно зашумленными, и поэтому для исследования межгодовых изменений осадков основное внимание уделено данным реанализов и стока рек. Ряды среднегодовых значений стока рек оказались менее зашумлены, чем данные с метеостанций, поскольку значение стока в устье реки интегрирует в себя осадки, выпавшие на всем ее водосборе.

По стоку рек исследовались среднегодовые значения, полученные для Северной Двины, Кемы, Нижнему Выгу, Онеге, Мезени, Поной и Ковде (см. рис. 1) за 1955—2019 гг. На всех графиках расхода рек проявляется положительный тренд, который наиболее выражен для реки Поной (расход $107—127 \text{ м}^3/\text{с}$, повышение стока на 16% за расчетный период), меньше всего для рек Мезень ($639—656 \text{ м}^3/\text{с}$) и Нижний Выг ($257—266 \text{ м}^3/\text{с}$, на 3%). В Северной Двине ($3051—3452 \text{ м}^3/\text{с}$) и Кеме ($269—304 \text{ м}^3/\text{с}$) повышение составило 12%, в Ковде ($327—257 \text{ м}^3/\text{с}$) и Онеге ($501—547 \text{ м}^3/\text{с}$) — 8%. В среднем по всем рассматриваемым водотокам повышение стока составило 11%. Стоит также отметить, что Ковда, Кемь и Нижний Выг зарегулированы. Северные реки изучаемого региона имеют относительно небольшие водосборы: $15\,400—26\,840 \text{ км}^2$. Реки южной части собирают сток со значительных водосборов: $27\,020—354\,000 \text{ км}^2$.

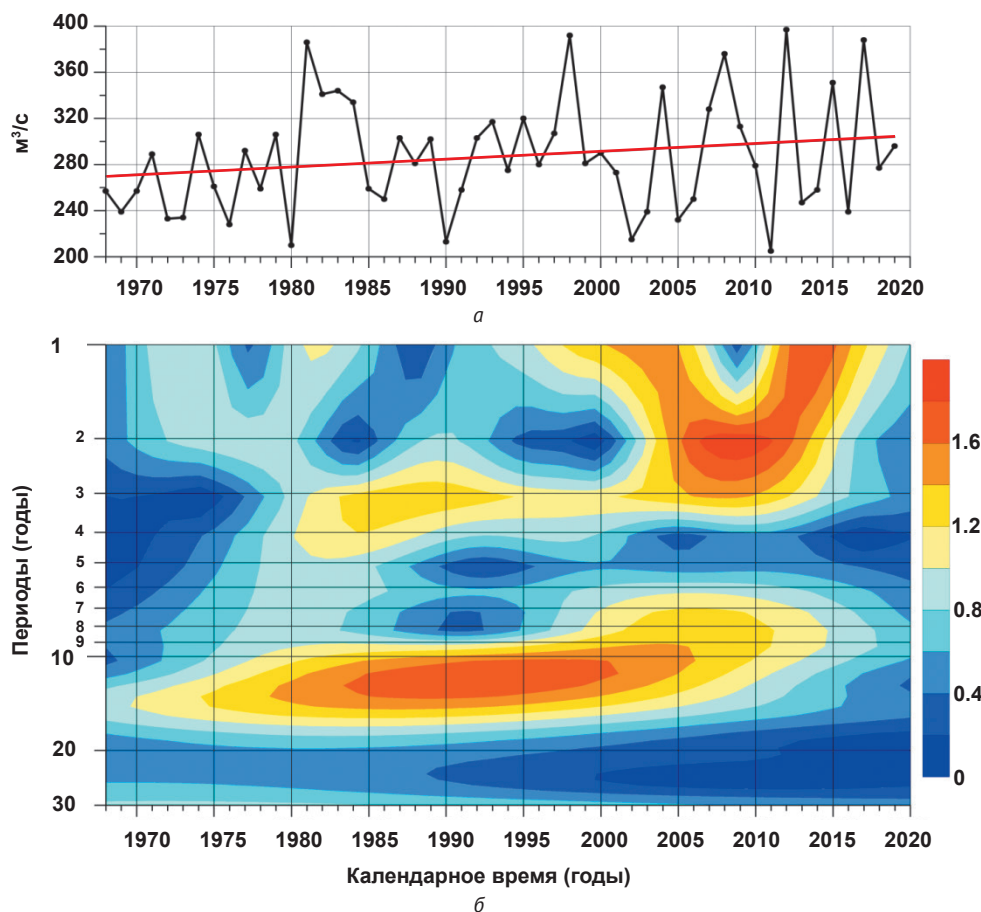


Рис. 4. Значения и линейный тренд временного ряда среднегодового расхода Кемь (створ гидрологического поста Путкинская ГЭС) за 1968–2019 гг. (а) и диаграмма его вейвлетного преобразования после нормирования ряда на среднее квадратическое отклонение (б)

Fig. 4. Values and linear trend of the time series of the average annual discharge of the Kem' River (site of the hydrological post of the Putkinskaya HPP) for 1968–2019 (a), and the diagram of its wavelet transform after normalizing the series to the standard deviation (b)

На рис. 4а в качестве примера представлен среднегодовой расход Кемь за 1968–2019 гг. На этом графике можно выделить годы с аномально высоким расходом: 1981, 1998, 2008, 2012, 2017 гг. Следует отметить, что число лет с аномально высоким расходом Кемь существенно увеличилось во второй половине рассматриваемого временного периода. Это может быть связано как с увеличением количества осадков, выпадающих на ее водосборе, так и с искусственным регулированием стока реки.

Диаграммы вейвлетных преобразований многолетних рядов стока указанных выше семи рек, впадающих в Белое море, и количества осадков в регионе Белого моря демонстрируют нестационарные колебания с периодами 2–4 и 12–14 лет. Эти периоды отмечены желто-красной цветовой гаммой на диаграмме вейвлетного преобразования среднегодового расхода Кемь (рис. 4б). Колебания с периодами 12–14 лет были обнаружены ранее в рядах приповерхностной температуры воздуха в регионе Белого моря [15], а также в рядах температуры Ба-

ренцева моря на различных глубинах [16]. В [17] показано, что колебание с квазипятнадцатилетним периодом характерно для западной части российской Арктики и связано с изменениями адвекции тепла из Северной Атлантики.

Хотя исследуемые ряды являются нестационарными, были оценены их энергетические спектры и формально построены 95%-ные доверительные интервалы. Оценки энергетических спектров аномалий стока рек и количества осадков в регионе Белого моря демонстрируют статистически значимые пики на периодах 2,8, 4,1 и ~13 лет (рис. 5). Однако следует принять во внимание нестационарность колебаний на этих периодах (см. рис. 4б).

Графики среднего годового расхода Кемь (см. рис. 4а) и аномалий среднегодового количества осадков в районе Белого моря (рис. 6а) демонстрируют рост этих параметров с середины 1970-х годов по настоящее время. В [18–20] показано, что с середины 1970-х влияние Северной Атлантики на Евразийский континент усилилось по сравнению с 1950–1976 гг. Это также подтверждают резуль-

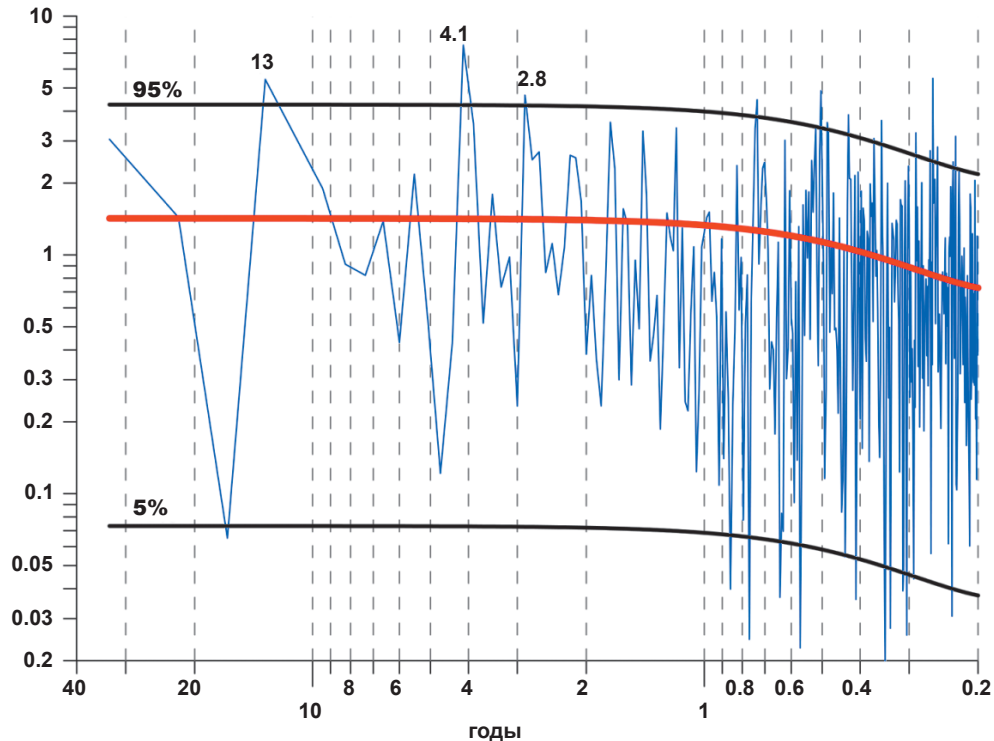


Рис. 5. Энергетический спектр (синий) ряда аномалий среднемесячного количества осадков над сушей в регионе Белого моря по данным PREC/L за 1956–2021 гг. после предварительного нормирования на его среднеквадратическое отклонение. Отмечен доверительный интервал от 5% (черная линия внизу) до 95% (черная линия сверху) и спектр красного шума (красная линия)
 Fig. 5. Energy spectrum (blue) of a series of anomalies in mean monthly precipitation over land in the White Sea region according to PREC/L data for 1956–2021 after preliminary normalization to its standard deviation. Confidence interval from 5% (black line at the bottom) to 95% (black line at the top) and red noise spectrum (line red) are marked

таты работы [21], демонстрирующие, что в 1977–1998 гг. климат в регионе Белого моря стал более морским.

На рис. 6а видно, что самыми влажными за более чем полувековой период оказались летние периоды 2016, 2017 и 2020 гг. и зимы 2019–2021 гг. Возможно, наблюдаемый рост количества осадков в эти годы вызван потеплением в Арктике за последние десятилетия, сокращением концентрации морского льда и увеличением потоков скрытого тепла и влаги из океана в атмосферу в регионе Баренцева и Карского морей.

На диаграмме вейвлетного преобразования аномалий среднемесячного количества осадков над сушей в регионе Белого моря за 1956–2021 гг. (рис. 6б) наблюдаются нестационарные колебания с периодами 1–8 и 10–16 лет, которые могут быть связаны с Северо-Атлантическим и Арктическим колебаниями. Для проверки этой гипотезы мы рассчитали диаграммы вейвлетных кросс-корреляций между аномалиями среднемесячного количества осадков над сушей в регионе Белого моря по данным PREC/L за 1956–2021 гг. и индексами Северо-Атлантического и Арктического колебаний (рис. 7). На этих диаграммах красно-желтой цветовой гаммой обозначены периоды синхронных колебаний указанных временных рядов, а сине-голубой —

периоды их противофазных колебаний. Построенные диаграммы демонстрируют положительные связи осадков в регионе Белого моря с индексом САК на периодах 2–8 лет, и отрицательные связи с индексом АК на периодах 10–16 лет.

Следует принять во внимание, что Северо-Атлантическое и Арктическое колебания оказывают влияние не только на регион Белого моря, но и друг на друга. Более того, изменения климата, происходящие в регионе Белого моря, могут оказывать обратное воздействие на Северную Атлантику и Арктику в целом. Таким образом, обнаруженные взаимосвязи являются сложными и нелинейными. И поиск физических механизмов взаимодействия Северной Атлантики, Арктики и региона Белого моря требует дополнительных исследований.

Выводы

1. Для всех исследованных рек водосбора Белого моря отмечаются положительные тренды в изменении их расходов (в среднем 11% за 1955–2019 гг.). Это может быть связано с наблюдающимся увеличением количества выпадающих осадков в регионе за тот же расчетный период.

2. Наибольший рост количества осадков выявлен с середины 1970-х по 2021 г. Сильнее всего он проявился в районах Кандалакшского и Двинского

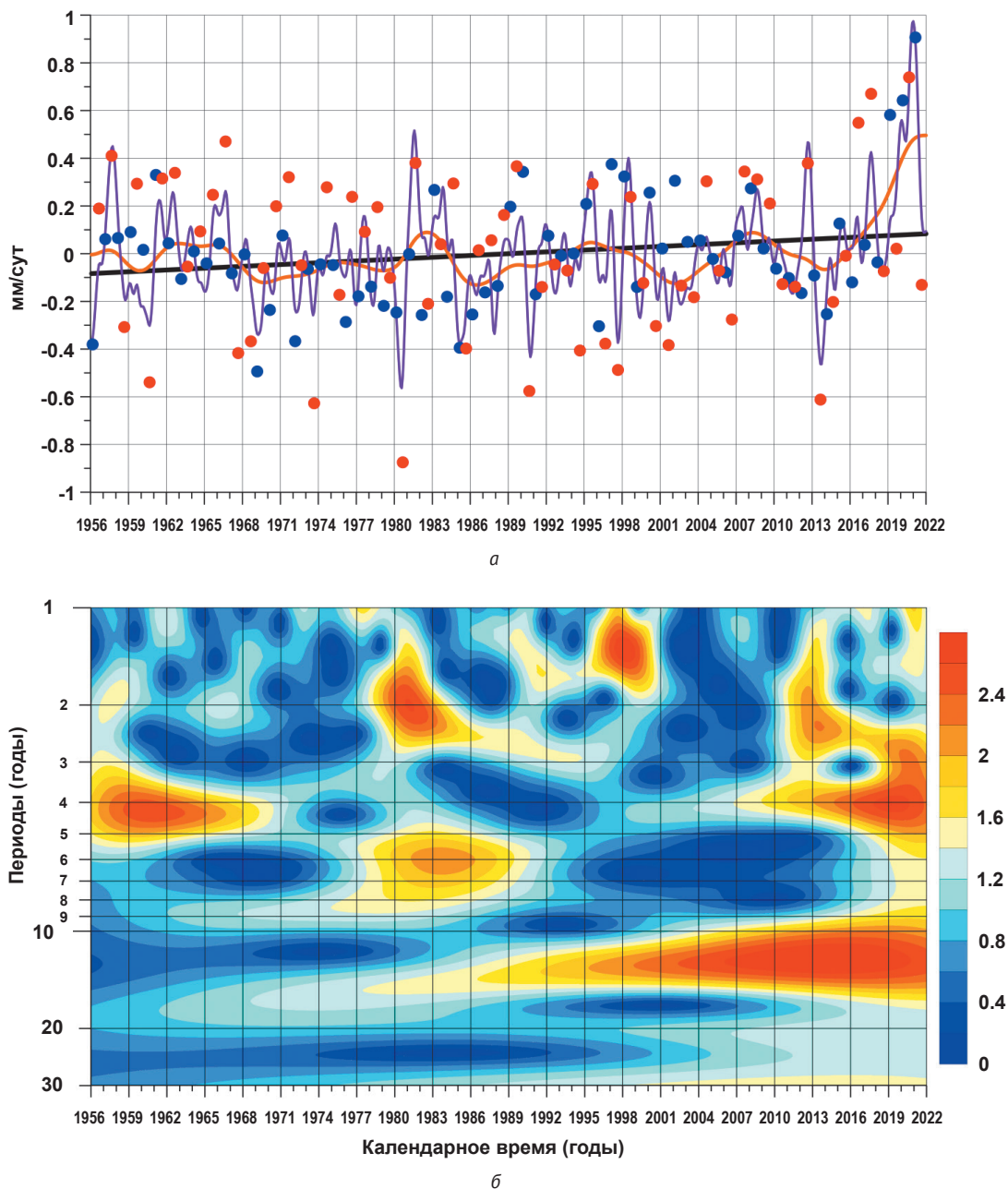


Рис. 6. Изменения аномалий среднемесячного количества осадков над сушей в регионе Белого моря по данным PREC/L за 1956–2021 гг., сглаженные однолетним (фиолетовый цвет) и семилетним (оранжевый цвет) фильтрами Баттерворта нижних частот, а также их линейный тренд (черный цвет); кругами отмечены средние значения аномалий для гидрологической зимы (январь–март) (синий цвет) и гидрологического лета (июль–сентябрь) (красный цвет) (а); диаграмма вейвлетного преобразования этого ряда после предварительного удаления линейного тренда и нормирования на его среднеквадратическое отклонение (б)
Fig. 6. Changes in the anomalies of mean monthly precipitation over land in the White Sea region according to PREC/L data for 1956–2021, smoothed with 1-year (purple color) and 7-year (orange color) Butterworth low-pass filters, as well as their linear trend (black color); the circles mark the average values of anomalies for the hydrological winter (January–March) (blue color) and the hydrological summer (July–September) (red color) (a); the diagram of the wavelet transform of this series after preliminary removal of the linear trend and normalization to its standard deviation (b)

заливов и на водосборе Северной Двины. Это может быть связано с усилением влияния Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана на весь регион Белого моря. Однако такая мозаичность в распределениях требует дополнительных исследований и осмысления результатов.

3. Изменения количества осадков в регионе Белого моря за период спутниковых наблюдений (1980–2021 гг.), оцененные с помощью линейного тренда, распределены неравномерно. На северо-востоке и юго-западе рассматриваемого региона наблюдается понижение среднесуточного количества осад-

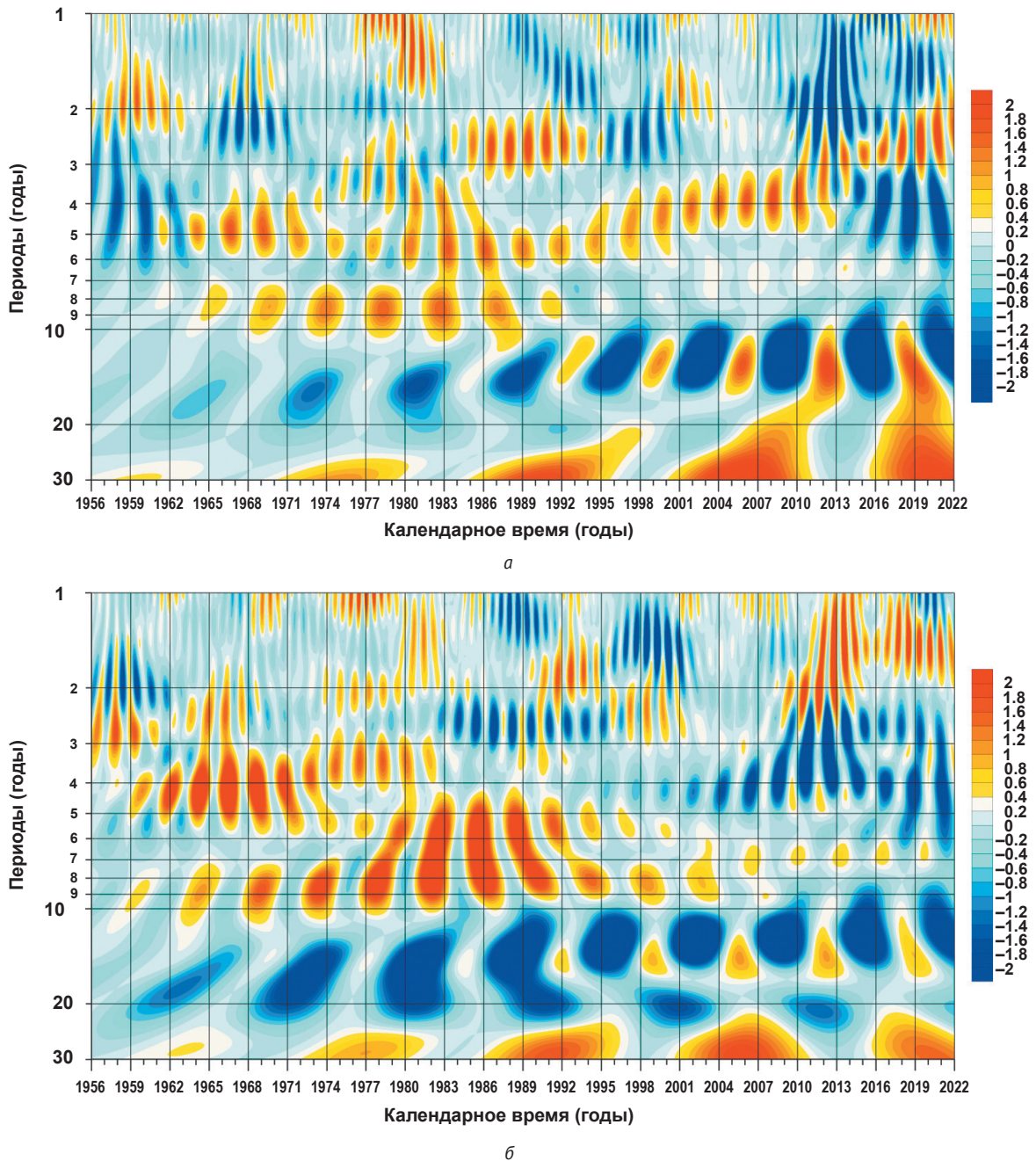


Рис. 7. Диаграммы вейвлетных кросс-корреляций аномалий среднемесячного количества осадков над сушей в регионе Белого моря по данным PREC/L за 1956–2021 гг. и индексов Северо-Атлантического (а) и Арктического (б) колебаний после предварительного удаления линейных трендов и нормирования рядов на их среднеквадратические отклонения

Fig. 7. Wavelet cross-correlation diagrams of anomalies in mean monthly precipitation over land in the White Sea region according to PREC/L data for 1956–2021 and indices of the North Atlantic (a) and Arctic (b) fluctuations, after preliminary removal of linear trends and normalization of the series to their root-mean-square deviations

ков на $0,02 \text{ кг/м}^2$ за 10 лет. Это в несколько раз меньше по абсолютной величине, чем увеличение осадков в центральной части исследуемого региона — приблизительно на $+0,06 \text{ кг/м}^2$ за 10 лет. За счет этого наблюдается общее увеличение количества осадков в регионе.

4. Изменчивость исследуемых характеристик (осадков и речного стока) демонстрирует нестаци-

онарные многомасштабные колебания. Среди них можно выделить периодичности 2,8, 4,1, ~13 лет. Колебание с квазипятнадцатилетним периодом характерно для западной части российской Арктики и, вероятно, связано с изменениями адвекции тепла из Северной Атлантики.

5. Данные измерений на метеостанциях и гидрологических постах согласуются с данными, предо-

ставленными реанализами, что позволит в дальнейшем строить зависимости процессов с расчетом на перспективу.

Исследование выполнено при поддержке темы госзадания ИВПС Карельского научного центра РАН «Комплексные исследования Белого моря и водосбора в интересах развития Арктической зоны РФ» № 121021700122-7.

Литература/References

1. Климатология / Под ред. О. А. Дроздова и др. — Л.: Гидрометеорология, 1989. — 568 с.
Klimatologiya. [Climatology]. Ed. by O. A. Drozdov et al. Leningrad, Gidrometeorologiya, 1989, 568 p. (In Russian).
2. Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / Отв. ред. Н. Н. Филатов. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. — 224 с.
Climate of Karelia: variability and influence on water objects and watersheds. Ed. by N. N. Filatov. Petrozavodsk, KarNC RAN, 2004, 224 p. (In Russian).
3. Slivinski L. C., Compo G. P., Whitaker J. S. et al. Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. *Q J R Meteorol. Soc.*, 2019, 145, pp. 2876—2908. Available at: <https://doi.org/10.1002/qj.3598>.
4. Fan Y., van den Dool H. Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5° resolution for 1948 to present. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, D10102. Available at: <https://doi.org/10.1029/2003JD004345>.
5. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP / NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, vol. 77, pp. 437—471. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2).
6. Chen M., Xie P., Janowiak J. E., Arkin P. A. Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations. *J. of Hydrometeorology*, 2002, vol. 3, iss. 5, pp. 249—266. Available at: [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2).
7. Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. of Climate*, 2017, 30 (14), pp. 5419—5454. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.
8. Adler R. F., Huffman G. J., Chang A. et al. The version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J. Hydrometeorology*, 2003, 4 (6), pp. 1147—1167. Available at: [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2).
9. Torrence D. C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. of the American Meteorological Society*, 1998, vol. 79, pp. 61—78. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTW>2.0.CO;2).
10. Torrence D. C., Webster P. J. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. *J. of Climate*, 1999,

vol. 12, pp. 2679—2690. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2679:ICITEM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2679:ICITEM>2.0.CO;2).

11. Вакуленко Н. В., Серых И. В., Сонечкин Д. М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. — Ч. 3: Предсказуемость Эль-Ниньо // Изв. высш. учеб. заведений. Прикладная нелинейная динамика. — 2018. — Т. 26, № 4. — С. 75—94. — DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94.
Vakulenko N. V., Seryh I. V., Sonechkin D. M. Chaos and order in atmospheric dynamics. Pt. 3. Predictability of El Niño. *Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Prikladnaya nelinein. dinamika*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 75—94. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94. (In Russian).
12. Serykh I. V., Sonechkin D. M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation. *Intern. J. of Climatology*, 2021, vol. 41, pp. 3781—3792. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12111443>.
13. van den Dool H. M., Saha S., Johansson Å. Empirical Orthogonal Teleconnections. *J. Climate*, 2000, 13, pp. 1421—1435. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1421:EOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1421:EOT>2.0.CO;2).
14. Higgins R. W., Leetmaa A., Kousky V. E. Relationships between climate variability and winter temperature extremes in the United States. *J. Climate*, 2002, 15, pp. 1555—1572. Available at: [https://doi.org/10.1175/15200442\(2002\)015<1555:RBCVAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(2002)015<1555:RBCVAW>2.0.CO;2).
15. Серых И. В., Толстиков А. В. О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2020. — № 4. — С. 83—95.
Serykh I. V., Tolstikov A. V. On the causes of the long-term variability of surface air temperature over the White Sea. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, 2020, no. 4, pp. 83—95. (In Russian).
16. Serykh I. V., Kostianoy A. G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature. *Ecologica Montenegrina*, 2019, vol. 25, pp. 1—13. DOI: 10.37828/em.2019.25.1.
17. Володин Е. М. О механизме колебания климата в Арктике с периодом около 15 лет по данным модели климата ИВМ РАН // Изв. Рос. акад. наук. Физика атмосферы и океана. — 2020. — Т. 56, № 2. — С. 139—149. — DOI: 10.31857/S0002351520020145.
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. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2020, 56, pp. 112—122. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0001433820020140>.
18. 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, pp. 705—709. Available at: <https://doi.org/10.48612/fpg/k9x4-p8fz-5kz6>.
19. 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, vol. 438, no. 2,

pp. 887—892. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X11060304>.

20. 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, no. 7. pp. 2863—2878. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.

21. Серых И. В., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Костяная Е. А. О переходе температурного режима регио-

на Белого моря в новое фазовое состояние // *Фундамент. и прикладная гидрофизика*. — 2022. — Т. 15, № 1. — С. 98—111. — URL: <https://doi.org/10.48612/fpg/k9x4-p8fz-5kz6>.

Serykh I. V., Kostyanoy A. G., Lebedev S. A., Kostyanaya E. A. On the Transition of Temperature Regime of the White Sea Region to a New Phase State. *Fundam. i prikladnaya gidrofizika*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 98—111. Available at: <https://doi.org/10.48612/fpg/k9x4-p8fz-5kz6>. (In Russian).

Информация об авторах

Толстиков Алексей Владимирович, кандидат географических наук, руководитель лаборатории географии и гидрологии, Институт водных проблем Севера, Карельский научный центр РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, 50), e-mail: alexeytolstikov@mail.ru.

Серых Илья Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории крупномасштабной изменчивости гидрофизических полей, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., 36), старший научный сотрудник, Геофизический центр РАН (119296, Россия, Москва, Молодежная ул., 3), e-mail: iserykh@ocean.ru.

Балаганский Андрей Федорович, главный гидролог лаборатории географии и гидрологии, Институт водных проблем Севера, Карельский научный центр РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, 50), e-mail: kar_shuia@mail.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Толстиков А. В., Серых И. В., Балаганский А. Ф. Климатические изменения стока рек и количества осадков в регионе Белого моря // *Арктика: экология и экономика*. — 2022. — Т. 12, № 4. — С. 464—474. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-464-474.

CLIMATE CHANGES IN RIVER FLOW AND PRECIPITATION IN THE WHITE SEA REGION

Tolstikov, A. V.

Northern water problems institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

Serykh, I. V.

Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Balagansky, A. F.

Northern water problems institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

The article was received on July 11, 2022

Abstract

On the basis of observational and reanalyzed data containing more than 60 years of time series, the authors studied climate changes and inter-annual variability of river flow, precipitation, soil and atmospheric moisture in the White Sea region. As an object of study, they consider the White Sea region — a territory that includes a square within 61°—70° NL and 30°—46° EL. The authors used open resources of Roshydromet, as well as various reanalysis data. For all the studied rivers of the White Sea catchment area, there are positive trends in the

change in their flow (on average 11% for the period 1955—2019). This may be due to the observed increase in precipitation in the region over the same calculation period. A significant increase in precipitation has been established since the mid-1970s until 2021. Changes in the amount of precipitation in the White Sea area over the period of satellite observations (1980—2021), estimated by a linear trend, are unevenly distributed. In the northeast and southwest of the region under consideration, there is a decrease in average daily precipitation by -0.02 kg/m^2 over 10 years. This decrease is several times less in absolute value than the increase in precipitation in the central part of the study area — by about $+0.06 \text{ kg/m}^2$ over 10 years. As a result, there has been an overall increase in precipitation throughout the region. The study shows that this growth is most pronounced in the areas of Kandalaksha and Dvina Bays, as well as in the catchment area of the Northern Dvina River. The authors assume that the observed increase in precipitation may be due to the increased influence of the North Atlantic and the Arctic Ocean on the White Sea region. The performed spectral and wavelet analysis revealed fluctuations in the studied parameters with periods of 2—4 years and 12—14 years. Via cross-wavelet analysis, the authors show the relationship between the inter-annual variability in the amount of precipitation in the White Sea region and the North Atlantic and Arctic oscillations.

Keywords. *Climate change, river flow, precipitation, wavelet analysis, the White Sea.*

The work was carried out according to the state assignment on the theme “Multipurpose studies of the White Sea and the watershed in the interests of the development of the Arctic zone of the Russian Federation” no. 121021700122-7.

Information about the authors

Tolstikov, Aleksey Vladimirovich, PhD of Geography, Head of the Laboratory of Geography and Hydrology, Northern water problems institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (50, Aleksander Nevsky prosp., Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, 185030), e-mail: alexeytolstikov@mail.ru.

Serykh, Ilya Viktorovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Large-Scale Variability of Hydrophysical Fields, Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, Russia, 117997), Senior Researcher, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya st., Moscow, Russia, 119396), e-mail: iserykh@ocean.ru.

Balagansky, Andrey Fedorovich, Chief Hydrologist, Laboratory of Geography and Hydrology, Northern water problems institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (50, Aleksander Nevsky prosp., Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, 185030), e-mail: kar_shuia@mail.ru.

Bibliographic description of the article

Tolstikov, A. V., Serykh, I. V., Balagansky, A. F. Climate changes in river flow and precipitation in the White Sea Region. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 4, pp. 464—474. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-464-474.

© Tolstikov A. V., Serykh I. V., Balagansky A. F., 2022