

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ В РЕГИОНЕ БЕЛОГО МОРЯ И ИХ РАСЧЕТ ПО МОДЕЛЯМ CMIP6 ДО 2099 Г.

А. В. Толстиков¹, И. В. Серых²

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

² Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2025 г.

Для цитирования

Толстиков А. В., Серых И. В. Климатические изменения количества осадков в регионе Белого моря и их расчет по моделям CMIP6 до 2099 г. // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 30—41. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-30-41.

Показано, что данные метеостанций и реанализов ERA5, PREC и MERRA-2, а также результаты экспериментов ансамбля из 32 моделей CMIP6 демонстрируют увеличение среднесуточного количества осадков (КО) в регионе Белого моря. Это повышение началось в 1980-х годах и продолжается до настоящего времени. По данным ERA5, одним из регионов наибольшего роста КО является акватория Белого моря: +0,2 мм/сут для 1994–2023 гг. по сравнению с 1940–1969 гг. Изменения КО до конца XXI в. рассмотрены по результатам экспериментов с различным радиационным форсингом (SSP) ансамбля из 32 моделей CMIP6. Повышение КО в 2070–2099 гг. по сравнению с 1994–2023 гг. составит от +0,11±0,08 до +0,27±0,11 мм/сут в зависимости от эксперимента SSP. К концу XXI в. на севере исследуемого региона ожидается более существенный рост КО по сравнению с югом. В 2024–2053 гг. по сравнению с 1994–2023 гг. КО в регионе Белого моря увеличится в среднем на +0,07±0,05 мм/сут в малой зависимости от эксперимента SSP.

Ключевые слова: изменение климата, Арктика, осадки, Белое море, модели CMIP6, эксперименты SSP.

Введение

Изучение современного климата важно с точки зрения его заметного влияния на экосистемы и хозяйственную деятельность человека [1], к тому же климатические изменения происходят в последние десятилетия относительно быстро. В условиях потепления климата динамика и интенсивность выпадения атмосферных осадков вызывают особый интерес.

Результаты исследований, посвященных атмосферным осадкам, выпадающим на территорию водосбора Белого моря, изложены, например, в следующих работах: «Белое море: Справочник «Проект «Моря СССР» [2], «The White Sea» [3], «Белое море и его водосбор...» [4], «Система Белого моря» [5]. Краткие обобщения приведены в [6–10], в государственных докладах об окружающей среде отдельных регионов и Российской Федерации [11].

Ранее нами показано [9], что в регионе Белого моря наибольший рост количества осадков выявлен с середины 1970-х по 2021 гг. и сильнее всего он проявился в районах Канда拉克шского и Двинского заливов, на водосборе Северной Двины. Это может быть связано с усилением влияния Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана на весь обширный регион западной части российской Арктики.

Водосбор Белого моря расположен в зоне избыточного увлажнения. Годовое количество осадков колеблется от 400 мм на севере Ненецкого автономного округа до 500–650 мм в Вологодской области и Карелии и до 700 мм на территории Республики Коми, в отдельных участках Мурманской области за год выпадает 900–1300 мм атмосферных осадков [8].

Интенсификация циклональной деятельности в Северной Атлантике приводит не только к изменчивости температурного режима в районе водосбора

Белого моря, но и к росту количества выпадающих здесь атмосферных осадков. По данным Третьего оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата на территории Российской Федерации [12] отмечено увеличение годовых сумм осадков практически на всей территории европейской территории страны. Рост годовых сумм осадков в последние годы отмечен и в докладе Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [13].

Внутригодовое количество выпадающих осадков на водосборе Белого моря распределено неравномерно. Наибольшее количество выпадает в теплый период года — до 60% годовой суммы [8], минимальное количество отмечается в конце зимы — весной. Среднее годовое число дней с осадками составляет в основном 190—210, в некоторых районах — до 220 дней. За день с осадками принимают такой, когда отмечено выпадение 0,1 мм и более осадков за сутки. Наибольшее число дней с осадками отмечается в холодный период года — с октября по февраль (до 20—25 дней за месяц). В течение последнего десятилетия XX и начала XXI вв. годовое число дней с осадками было в пределах или несколько ниже климатической нормы [8].

Количество твердых осадков за год по данным наблюдений всех метеостанций, расположенных на водосборе Белого моря, в последние годы значительно сократилось, и одновременно возросла доля смешанных осадков. Рост доли смешанных осадков согласуется с увеличением повторяемости оттепелей в течение холодного периода года. Поскольку выпадение твердых осадков регулируется температурой воздуха, то даже незначительное повышение средней годовой температуры приводит к существенному уменьшению доли твердых осадков в холодное время года.

В настоящей работе в качестве объекта исследования рассматривается регион Белого моря. Изменение количества осадков здесь за 1980—2021 гг. уже исследовалось нами ранее [9]. Целью данной работы являются анализ хода осадков в регионе Белого моря за более продолжительный период и оценка их возможных будущих изменений до конца XXI в.

Материалы и методы исследований

Использовались данные по среднемесячному количеству осадков десяти метеостанций, находящихся на водосборе Белого моря: Кандалакша, Гридино, Кемь (порт), Онега, Архангельск, Мезень, Канин Нос, Святой Нос, Каневка, Краснощелье за период 1961—2020 гг. Для анализа произошедших изменений из массива данных по каждой станции сравнивались два 30-летних периода 1961—1990 и 1991—2020 гг.

Также анализировались среднемесячные данные общего количества осадков региона Белого моря (55—70° с. ш. и 25—65° в. д.). Поскольку нас в данной работе прежде всего интересовали долгопериодные (междесятилетние) изменения, то анализировалось общее количество осадков за сутки, осредненное за месяц. Исследование проводилось по данным реанализа ECMWF ERA5 с пространствен-

ным разрешением 0,25° за 1940—2023 гг. [14], реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 на сетке 0,5° ш. × 0,625° д. за 1980—2023 гг. [15] и реанализа NOAA's PRECipitation REConstruction (PREC) на сетке 2,5° за 1948—2023 гг. [16]. В настоящее время реанализ ERA5 считается самым современным и одним из лучших, в том числе из-за высокого пространственного разрешения, что имеет большое значение для анализа осадков. Реанализ MERRA-2 основан на спутниковых данных и имеет также довольно высокое разрешение. Он применялся нами в [9] и показал хорошие результаты. Реанализ PREC создан достаточно давно и уже прошел длительную проверку. Он основан на оптимальной интерполяции данных метеостанций, поэтому его результаты должны быть к ним приближены. Таким образом, исследуемые реанализы являются хорошим дополнением и проверкой друг для друга.

Для оценки будущих изменений количества осадков до конца XXI в. использованы результаты модельных экспериментов SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 (Shared Socio-economic Pathways — SSPs) [17; 18] шестого этапа «Проекта сравнения совместных климатических моделей» (Coupled Model Intercomparison Project — CMIP6) [19]. Для проверки того, насколько хорошо модели CMIP6 воспроизводят произошедшие изменения количества осадков исследуемого региона, использованы результаты эксперимента Historical, которые сравнивались с результатами, полученными по метеостанциям и реанализам. В эксперименте Historical заложено влияние следующих основных внешних сил, действующих на глобальную климатическую систему: парникового эффекта, антропогенных аэрозолей, извержений вулканов и изменений солнечной активности. В экспериментах SSP основную роль играет радиационный форсинг (Вт/м²) от возможного изменения концентрации парниковых газов в атмосфере при различных сценариях будущего развития глобальной экономики.

Сценарии SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 охватывают широкий диапазон неопределенностей в будущих траекториях социально-экономического и радиационного воздействия (2,6, 4,5, 7,0 и 8,5 Вт/м² к концу XXI в.) — показатель степени, в которой парниковые газы нагревают или охлаждают атмосферу, причем более высокие значения отражают более сильный эффект потепления климата. Сценарий SSP1-2.6 предусматривает немедленное и существенное сокращение объема глобальных антропогенных выбросов CO₂, SSP2-4.5 — постепенное сокращение с середины XXI в., SSP3-7.0 — линейное увеличение до конца XXI в., SSP5-8.5 — экспоненциальное увеличение до 2060-х, а затем постепенное сокращение [17].

Применялся ансамблевый подход [1], заключающийся в осреднении результатов 32 моделей CMIP6 и оценке межмодельного разброса (стандартного отклонения). Мы полагаем, что такой подход наиболее оправдан при оценке будущих долгопериодных

изменений климата. Каждая из моделей CMIP6 содержит ошибки из-за чрезвычайной сложности, но эти ошибки не коррелированы с ошибками других моделей. Поэтому при осреднении по достаточно большому ансамблю (более 30 элементов) ошибки различных моделей подавляются, поскольку их можно уподобить белому шуму. Это приобретает особую важность при работе с данными осадков, поскольку они имеют большой разброс и зашумленность. При осреднении по ансамблю основная часть случайностей подавляется, и проявляется реакция на внешний форсинг, который играет определяющую роль в проекциях климата на длительный временной интервал (до конца XXI в.).

Чтобы вклад моделей CMIP6 в ансамбль был одинаков, от каждой из 32 моделей взят только один ее расчет. Следует отметить, что модель INM-CM единственная от России участвует в программе CMIP, и ее результаты также входят в рассматриваемый ансамбль. Для получения средних полей количества осадков по 32 моделям CMIP6 результаты каждой модели предварительно линейно интерполировались на единую сетку $1 \times 1^\circ$. В качестве нормы, относительно которой вычислялись средний сезонный ход и аномалии осадков, выбрано среднее за 30-летний период 1981—2010 гг. Произшедшие и будущие изменения осадков оценивались на основе разности между 30-летними периодами. Изменения также оценивались с помощью линейных трендов методом наименьших квадратов, но этот метод показал неустойчивость из-за чувствительности к краевым значениям, на которые большое влияние оказывает высокая короткопериодная (межгодовая) изменчивость данных осадков.

Эксперимент Historical завершился в 2014 г., а эксперименты SSP начались в 2015 г. Если период усреднения захватывал этот переход, то в итоговое среднее значение входили результаты эксперимента Historical по 2014 г., а начиная с 2015 г. — результаты экспериментов SSP. Данная методика уже была применена нами для анализа изменений температуры обширного региона западной части российской Арктики и более подробно описана в [20].

Обсуждение результатов исследований

Анализ данных метеостанций показал, что за период 1991—2020 гг. количество осадков, выпавших в районе побережья Белого моря, было больше, чем в 1961—1990 гг. (рис. 1). Климатические нормы

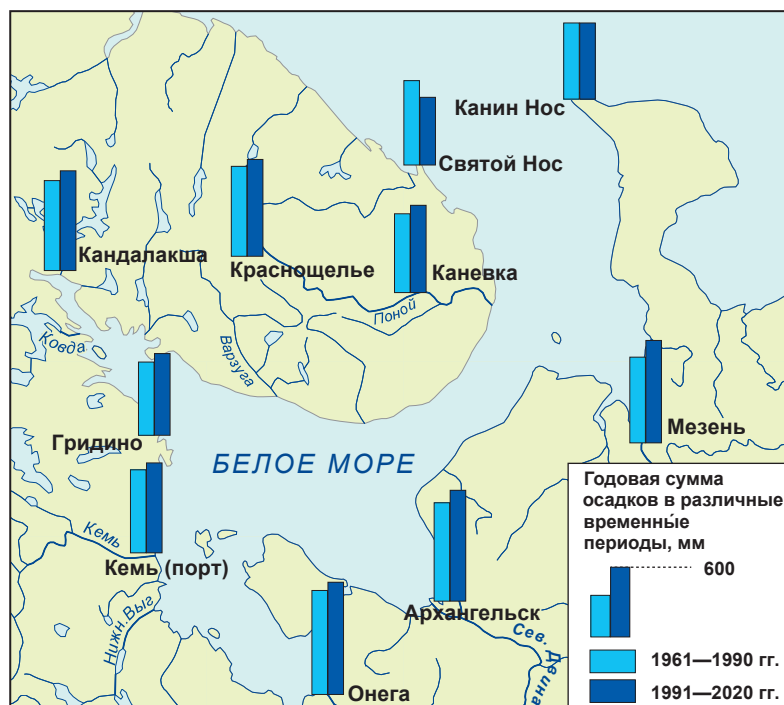


Рис. 1. Распределение осадков за два периода по данным постов, расположенных на водосборе Белого моря, мм

Fig. 1. Distribution of precipitation for two periods according to data from stations located in the White Sea watershed area, mm

годовых сумм осадков увеличились в среднем на 40—90 мм.

В табл. 1 показана внутригодовая изменчивость климатических норм осадков в разные периоды. Обращает на себя внимание, что по станции Святой Нос количество осадков уменьшилось, а по станции Кандин Нос заметного изменения не наблюдается, тогда как по всем остальным пунктам наблюдений оно увеличилось. Причина может быть в следующем. Станции Святой Нос и Кандин Нос расположены на границе Белого и Баренцева морей, на далеко выступающих мысах, поэтому испытывают сильное воздействие окружающей морской среды. В последние 20 лет по данным наблюдений большинства станций (кроме указанных выше) преобладают положительные тенденции изменения годовых сумм атмосферных осадков. Однако в [21] отмечено, что «региональные тренды наблюдаются на фоне существенных колебаний с периодом в несколько десятилетий, так что нельзя с уверенностью утверждать наличие тренда, а, возможно, лишь наличие определенной фазы таких колебаний». Также наблюдающаяся региональная неоднородность в тенденциях изменения количества осадков отмечена в [12].

Внутри года максимум в количестве осадков приходится на июль-август. Для станций Кандин Нос и Святой Нос также выражен пик в августе, но максимальное количество осадков приходится на октябрь. Минимум на всех станциях растянут на несколько месяцев и отмечается в конце зимы —

Таблица 1. Изменчивость климатических норм месячных и годовых сумм осадков в различные временные периоды по данным пунктов метеонаблюдений, расположенных на побережье Белого моря, мм

Table 1. Variability of climatic norms of monthly and annual precipitation amounts in different time periods according to meteorological observation posts located on the White Sea coast, mm

Пункт метеонаблюдений	Временной период	Месяц												За год
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
МГ-2 Святой Нос	1961—1990	37	28	22	24	25	39	46	58	54	60	46	39	478
	1991—2020	26	18	21	20	24	38	39	51	44	48	30	27	384
	Δ, мм	-11	-10	-1	-4	-1	0	-7	-6	-11	-12	-16	-12	-94
М-2 Каневка	1961—1990	28	19	24	24	33	47	51	58	52	48	33	31	449
	1991—2020	26	24	26	26	45	51	59	70	54	50	35	35	501
	Δ, мм	-2	5	2	2	12	4	7	12	2	2	2	4	52
М-2 Краснощелье	1961—1990	31	22	27	29	38	52	66	71	54	50	40	33	513
	1991—2020	33	29	30	29	47	59	68	72	49	54	39	40	549
	Δ, мм	2	7	3	0	9	7	2	1	-5	4	-1	7	36
ОГМС Кандакша	1961—1990	34	26	28	25	37	52	66	62	58	51	44	32	515
	1991—2020	40	33	30	28	44	55	75	64	55	52	46	44	566
	Δ, мм	6	7	2	3	7	3	9	2	-3	1	2	12	51
МГ-2 Гридино	1961—1990	24	17	20	20	28	42	52	60	49	44	36	28	420
	1991—2020	33	25	22	21	37	46	53	59	46	47	40	37	466
	Δ, мм	9	8	2	1	9	3	2	-2	-3	3	4	9	45
МГ-2 Кемь (порт)	1961—1990	22	16	19	26	35	50	55	71	55	50	41	30	470
	1991—2020	27	22	21	28	48	58	65	69	53	53	41	32	517
	Δ, мм	5	6	2	2	13	8	10	-2	-2	3	0	2	47
МГ-2 Онега	1961—1990	34	28	29	32	37	55	63	75	70	69	59	43	594
	1991—2020	44	32	30	28	45	62	74	77	68	69	55	51	636
	Δ, мм	10	4	1	-4	8	7	11	2	-2	0	-4	8	42
М-2 Архангельск	1961—1990	33	27	26	31	42	54	61	68	60	61	53	44	560
	1991—2020	41	32	31	32	48	65	75	82	62	68	51	48	635
	Δ, мм	8	5	5	1	6	11	14	14	2	7	-2	4	75
АМСГ Мезень	1961—1990	27	22	22	25	30	48	53	67	61	60	41	36	492
	1991—2020	34	28	26	27	42	59	65	82	71	62	45	41	582
	Δ, мм	7	6	4	2	12	11	12	15	10	2	4	5	90
МГ-2 Канин Нос	1961—1990	39	28	27	21	21	29	35	47	46	53	44	44	434
	1991—2020	39	31	27	22	24	33	35	47	45	54	42	38	437
	Δ, мм	0	3	0	1	3	4	0	0	-1	1	-2	-6	3

Примечание. МГ-2 — морская береговая гидрометеорологическая станция 2-го разряда, М-2 — метеорологическая станция 2-го разряда, ОГМС — объединенная гидрометеорологическая станция, АМСГ — авиационная метеорологическая станция гражданская.

Note. MG-2 — marine coastal hydrometeorological station of 2nd category, M-2 — meteorological station of the 2nd category, OGMS — joint hydrometeorological station, AMSG — civil aviation meteorological station.

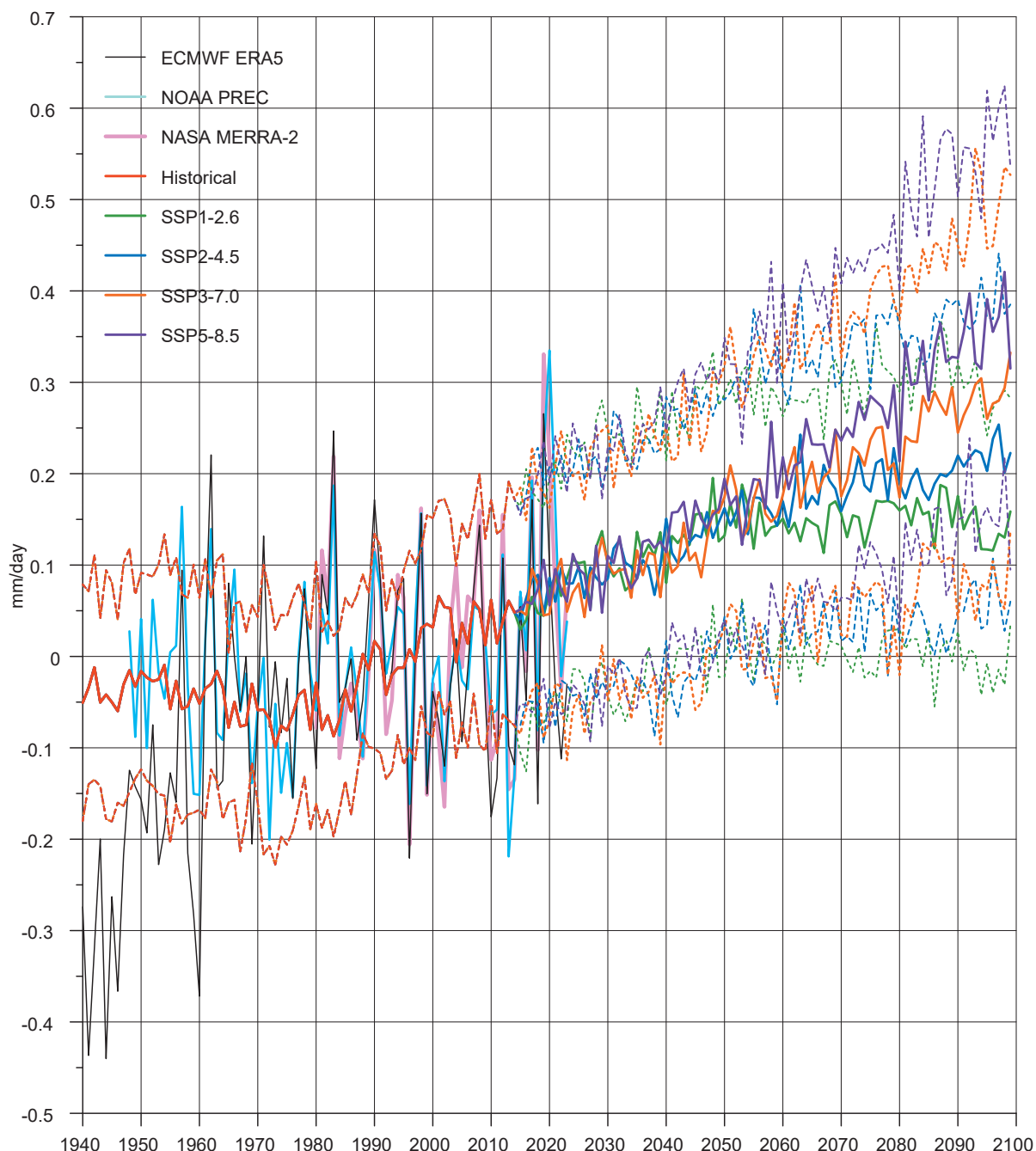


Рис. 2. Графики изменений годовых аномалий среднего количества осадков региона Белого моря (55–70° с. ш., 25–65° в. д.) по данным ECMWF ERA5 за 1940–2023 гг. (черный цвет), по данным NOAA PREC за 1948–2023 гг. (голубой), по данным NASA MERRA-2 за 1980–2023 гг. (розовый), и по результатам экспериментов моделей CMIP6 для сценариев: Historical за 1940–2014 гг. (красный), SSP1-2.6 (зеленый), SSP2-4.5 (синий), SSP3-7.0 (оранжевый) и SSP5-8.5 (фиолетовый) за 2015–2099 гг. Границы диапазонов изменчивости 32 моделей CMIP6 (стандартное отклонение) представлены пунктирными линиями

Fig. 2. Graphs of changes in annual anomalies of average precipitation in the White Sea region (55–70° N, 25–65° E) according to ECMWF ERA5 data for 1940–2023 (black), based on NOAA PREC data 1948–2023 (blue), according to NASA MERRA-2 data for 1980–2023 (pink), and based on the results of CMIP6 model experiments for scenarios: Historical for 1940–2014 (red), SSP1-2.6 (green), SSP2-4.5 (blue), SSP3-7.0 (orange) and SSP5-8.5 (purple) for 2015–2099. The boundaries of the variability ranges of the 32 CMIP6 models (standard deviation) are represented by dotted lines

начале весны, для станции Канин Нос это конец весны. При сравнении двух периодов (1961–1990 и 1991–2020 гг.) хорошо заметно, что наибольший рост количества осадков в последние годы выражен весной — в начале лета и также отчетливо проявляется зимой для всех станций исследуемого региона

за исключением станций Канин Нос и Святой Нос. Наибольшие изменения в количестве осадков произошли в пунктах Мезень, Архангельск и Святой Нос.

На рис. 2 представлены графики изменений годовых аномалий среднего количества осадков региона Белого моря по данным ERA5 за 1940–2023 гг.,

PREC за 1948—2023 гг. и MERRA-2 за 1980—2023 гг. Видно, что ERA5 и PREC достаточно хорошо согласуются друг с другом начиная с 1960-х. Результаты MERRA-2 за 1980—2023 гг. также хорошо согласуются с другими реанализами. ERA5 и PREC демонстрируют увеличение количества осадков с середины 1970-х. Однако при этом наблюдается сильная межгодовая изменчивость, затрудняющая оценку этого увеличения. Данные MERRA-2 также демонстрируют повышение осадков, но с середины 1980-х, поскольку в начале 1980-х в течение нескольких лет по всем реанализам наблюдались положительные аномалии осадков, по всей видимости, связанные с межгодовой климатической изменчивостью. Сильная межгодовая изменчивость количества осадков наблюдается за весь период наблюдений и заметно затрудняет анализ междесятилетних изменений. Для ее подавления и выделения более низкочастотного сигнала применено осреднение по ансамблю 32 моделей CMIP6.

Изменения годовых аномалий среднего количества осадков по результатам экспериментов Historical (до 2014 г., см. рис. 2, красный график) и SSP (после 2015 г., см. рис. 2, зеленый, синий,

оранжевый и фиолетовый графики) ансамбля 32 моделей CMIP6 демонстрирует их увеличение с 1980-х. Нужно отметить, что при осреднении по ансамблю из-за несовпадения периодов и фаз колебаний у различных моделей подавляется естественная климатическая изменчивость. Из-за этого в средних значениях по ансамблю остаются в основном только изменения, вызванные внешними воздействиями едиными для всех моделей — радиационным форсингом от парниковых газов, антропогенных аэрозолей, извержений вулканов и изменений солнечной активности. При этом межгодовая изменчивость количества осадков по реанализам почти полностью укладывается в межмодельный разброс, представленный на рис. 2 пунктирными линиями.

Изменения среднего количества осадков региона Белого моря для каждой из 32 моделей в отдельности представлены в табл. 2. Среднемодельные изменения количества осадков региона Белого моря между 1940—1969 и 1994—2023 гг. составили для ансамбля 32 моделей CMIP6 $+0,08 \pm 0,05$ мм/сут (см. табл. 2, столбец 3). При этом данные по 2014 г. брались из эксперимента Historical, а за 2015—2023 гг. — из эксперимента SSP2-4.5. Поскольку эксперимен-

Таблица 2. Изменения среднего количества осадков региона Белого моря (55—70° с. ш., 25—65° в. д.) по различным сценариям CMIP6, мм/сут

Table 2. Changes in average precipitation in the White Sea region (55—70°N, 25—65°E) according to various CMIP6 scenarios, mm/d

Организация	Модель	Разность между 1994—2023 и 1940—1969 гг.	Разность между 2024—2053 и 1994—2023 гг.				Разность между 2070—2099 и 1994—2023 гг.			
		Historical и SSP2-4.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
AS-RCEC	TaiESM1	–0,02	0,13	0,08	0,04	0,04	0,12	0,20	0,16	0,23
AWI	AWI-CM-1-1-MR	0,11	0,07	0,11	0,10	0,14	0,14	0,18	0,20	0,29
BCC	BCC-CSM2-MR	0,06	0,04	0,05	0,10	0,11	0,11	0,13	0,26	0,24
CAMS	CAMS-CSM1-0	0,03	0,14	0,12	0,17	0,10	0,14	0,21	0,28	0,23
CAS	CAS-ESM2-0	0,06	0,11	0,07	0,07	0,06	0,18	0,30	0,27	0,41
CAS	FGOALS-f3-L	0,09	0,01	0,03	0,04	0,08	0,03	0,11	0,19	0,22
CAS	FGOALS-g3	0,09	–0,01	0,05	0,06	0,04	0,02	0,09	0,19	0,19
CCCma	CanESM5	0,11	0,16	0,14	0,13	0,20	0,26	0,35	0,43	0,62
CCCma	CanESM5-CanOE	0,17	0,17	0,13	0,15	0,17	0,21	0,27	0,52	0,53
CMCC	CMCC-CM2-SR5	0,07	0,06	0,15	0,12	0,04	0,13	0,14	0,21	0,29
CMCC	CMCC-ESM2	0,03	0,10	0,11	0,09	0,07	0,24	0,20	0,13	0,24

Органи- зация	Модель	Разность между 1994— 2023 и 1940— 1969 гг.	Разность между 2024— 2053 и 1994—2023 гг.				Разность между 2070— 2099 и 1994—2023 гг.			
		Historical и SSP2-4.5	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5
CNRM- CERFACS	CNRM-CM6-1	0,20	-0,01	-0,02	0,01	0,03	0,02	0,00	0,14	0,23
CNRM- CERFACS	CNRM-CM6- 1-HR	0,13	0,15	0,06	0,06	0,04	0,11	0,12	0,22	0,26
CNRM- CERFACS	CNRM-ESM2-1	0,11	-0,01	0,05	0,03	0,04	0,05	0,20	0,17	0,25
CSIRO- ARCCSS	ACCESS-CM2	0,08	0,17	0,12	0,09	0,14	0,24	0,28	0,28	0,36
CSIRO	ACCESS- ESM1-5	0,08	0,17	0,04	-0,02	0,20	0,18	0,18	0,21	0,24
EC-Earth- Consortium	EC-Earth3	0,05	0,13	0,12	0,11	0,09	0,20	0,33	0,38	0,48
EC-Earth- Consortium	EC-Earth3-Veg	0,25	0,09	0,10	0,05	0,18	0,16	0,22	0,34	0,41
INM	INM-CM4-8	0,07	-0,01	0,03	0,01	0,04	0,04	0,12	0,15	0,19
INM	INM-CM5-0	0,04	0,15	0,11	0,10	0,14	0,13	0,18	0,26	0,27
IPSL	IPSL-CM6A-LR	0,10	0,02	0,04	0,05	0,05	0,13	0,15	0,22	0,28
MIROC	MIROC-ES2L	0,12	0,08	0,03	0,03	0,08	0,06	0,13	0,15	0,23
MIROC	MIROC6	0,01	0,11	0,10	0,08	0,09	0,09	0,13	0,13	0,17
MOHC	UKESM1-0-LL	0,10	0,15	0,08	0,16	0,11	0,22	0,18	0,23	0,23
MPI-M	MPI-ESM1- 2-LR	0,03	0,12	0,08	0,09	0,05	0,07	0,15	0,20	0,18
MRI	MRI-ESM2-0	0,09	0,07	0,12	0,11	0,06	0,01	0,18	0,26	0,24
NCAR	CESM2	0,10	0,04	-0,01	0,02	0,06	0,01	0,05	0,07	0,17
NCAR	CESM2- WACCM	0,06	0,05	0,03	0,04	0,10	0,03	0,08	0,08	0,17
NCC	NorESM2-LM	0,09	0,03	0,04	0,03	0,03	0,01	0,02	0,08	0,13
NCC	NorESM2-MM	0,07	0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,02	0,03	0,09
NIMS-KMA	KACE-1-0-G	0,03	0,07	0,08	0,06	0,07	0,12	0,05	0,13	0,28
NOAA-GFDL	GFDL-ESM4	0,06	0,09	0,05	0,08	0,04	0,11	0,13	0,19	0,25
Минимум		-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	0,01	0,00	0,03	0,09
Максимум		0,25	0,17	0,15	0,17	0,20	0,26	0,35	0,52	0,62
Стандартное отклонение		0,05	0,06	0,04	0,05	0,05	0,08	0,09	0,10	0,11
Среднее		0,08	0,08	0,07	0,07	0,08	0,11	0,16	0,21	0,27

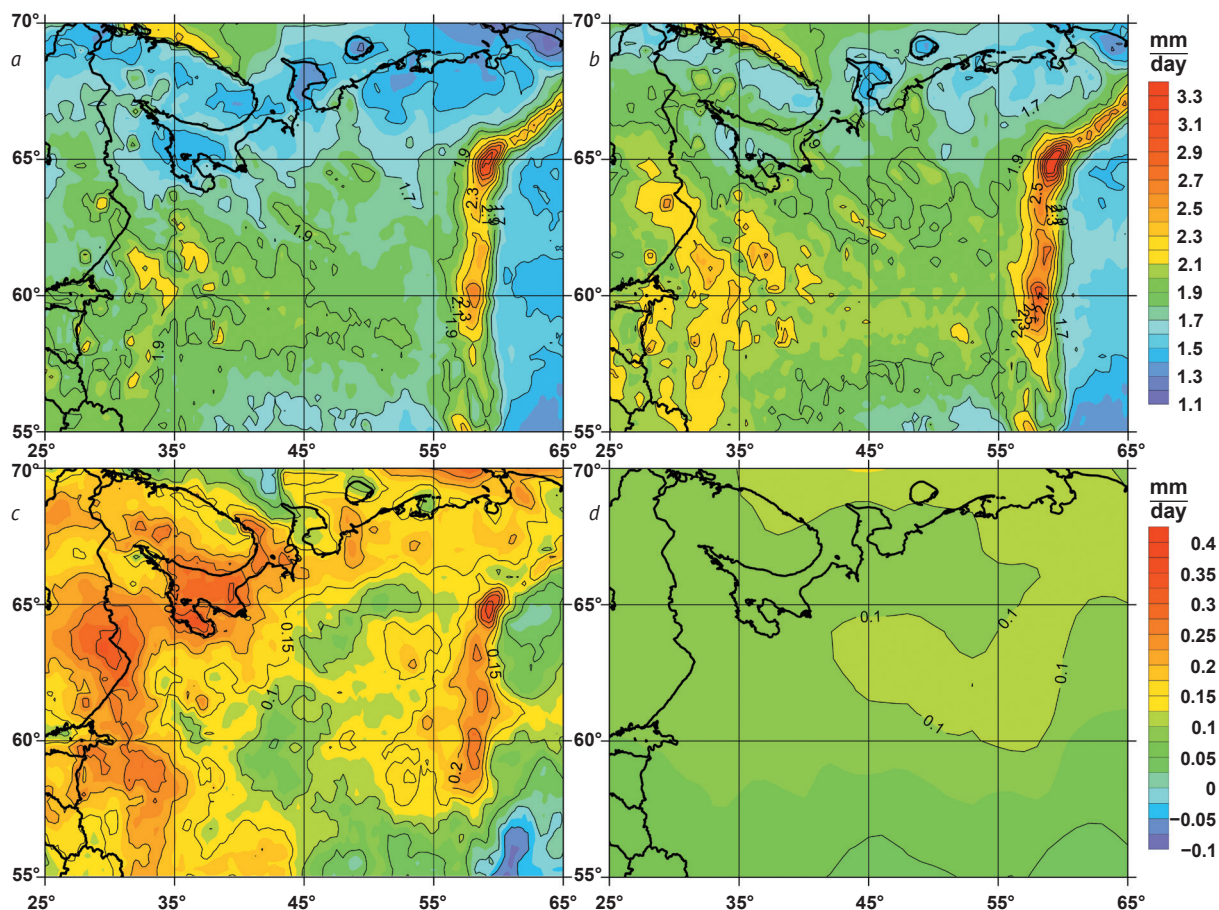


Рис. 3. Поля среднего количества осадков по данным ERA5 за 1940–1969 гг. (a), за 1994–2023 гг. (b), разность между ними (c), средняя разность между этими периодами по 32 моделям CMIP6 (сценарии Historical и SSP2-4.5) (d)
 Fig. 3. Fields of average precipitation according to ERA5 data for 1940–1969 (a), for 1994–2023 (b), difference between them (c), average difference between these periods according to 32 CMIP6 models (Historical and SSP2-4.5 scenarios) (d)

ты SSP имеют малые различия за 2015–2023 гг. (см. рис. 2), то вместо SSP2-4.5 вполне можно было бы выбрать другой эксперимент. Минимальное значение изменения количества осадков между 1940–1969 и 1994–2023 гг. составило $-0,02$ мм/сут для модели TaiESM1, а максимальное — $+0,25$ мм/сут по модели EC-Earth3-Veg, что свидетельствует о существенных различиях между моделями в воспроизведении изменений осадков исследуемого региона.

В районе исследования существует пространственная неоднородность как самого количества осадков (рис. 3a и 3b), так и их изменений (рис. 3c). Данные ERA5 показывают, что наибольшее количество осадков здесь выпадает в районе Уральских гор (рис. 3a и 3b), который также является одним из районов наибольшего роста среднесуточного количества осадков между 1940–1969 и 1994–2023 гг. ($+0,2$ мм/сут, рис. 3c). Другими районами наиболее существенного увеличения количества осадков являются акватория Белого моря и западная часть исследуемого региона ($+0,2$ мм/сут). По данным ERA5 количество осадков между 1940–1969 и 1994–2023 гг. понизилось только на юго-востоке исследуемого региона (рис. 3c).

Среднее по ансамблю 32 моделей CMIP6 также демонстрирует увеличение количества осадков в исследуемом регионе (рис. 3d), но не воспроизводит указанные выше пространственные особенности из-за более низкого разрешения моделей ($1-2^\circ$) по сравнению с данными ERA5 ($0,25^\circ$). Тем не менее полученные результаты свидетельствуют, что ансамбль 32 моделей CMIP6 в целом отражает произошедшее увеличение осадков региона Белого моря и, исходя из этого, его можно использовать для проекции изменений осадков в будущем.

Следует отметить, что проекции климата отличаются от прогнозов погоды тем, что для прогноза большое значение имеют начальные условия, а в климатических проекциях важны внешние воздействия, заложенные в модельном эксперименте. Такими внешними воздействиями для экспериментов SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 являются изменения значений радиационного форсинга от концентрации парниковых газов в атмосфере, которые к концу XXI в. составят соответственно 2,6, 4,5, 7,0 и 8,5 Вт/м², что указано в их названиях.

Будущие изменения количества осадков до конца XXI в. рассмотрены по результатам экспериментов

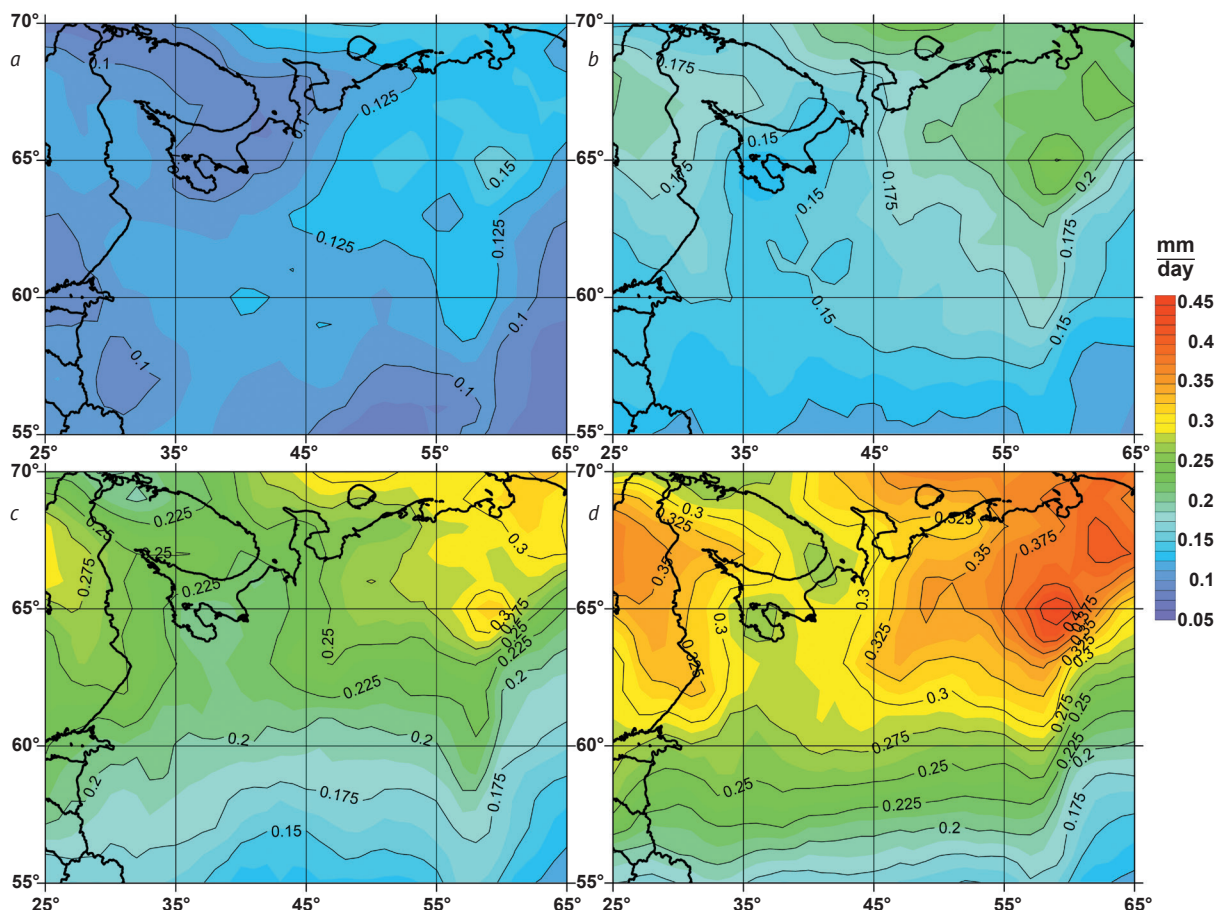


Рис. 4. Поля изменений среднего количества осадков за сутки по 32 моделям CMIP6 между 1994–2023 и 2070–2099 гг. по результатам сценариев Historical и SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d)
Fig. 4. Fields of changes in average daily precipitation for 32 CMIP6 models between 1994–2023 and 2070–2099 based on the results of scenarios Historical and SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d)

SSP ансамбля из 32 моделей CMIP6, которые демонстрируют их увеличение (см. рис. 2). Так, повышение среднесуточного количества осадков между 1994–2023 и 2070–2099 гг. составит $+0,11 \pm 0,08$, $+0,16 \pm 0,09$, $+0,21 \pm 0,10$, $+0,27 \pm 0,11$ мм/сут по результатам экспериментов SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 соответственно (см. табл. 2, столбцы 8–11). Таким образом, полученные проекции изменения количества осадков региона Белого моря в сильной степени зависят от величины радиационного форсинга.

В ближайшие 30 лет среднесуточное количество осадков в регионе Белого моря увеличится на $+0,07 \pm 0,05$ мм/сут в малой зависимости от эксперимента SSP (см. рис. 2). Так, повышение среднесуточного количества осадков между 1994–2023 и 2024–2053 гг. составит $+0,08 \pm 0,06$, $+0,07 \pm 0,04$, $+0,07 \pm 0,05$, $+0,08 \pm 0,05$ мм/сут по результатам экспериментов SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 соответственно (см. табл. 2, столбцы 4–7). Это связано с тем, что в первые десятилетия концентрации парниковых газов в атмосфере имели малые различия между экспериментами SSP. Но к концу XXI в. эти различия станут существенными. Следу-

ет отметить, что согласно сценарию SSP5-8.5 все рассмотренные модели CMIP6 показывают увеличение среднего количества осадков региона Белого моря с минимальным значением $+0,09$ мм/сут для модели NorESM2-MM до максимального значения $+0,62$ мм/сут для модели CanESM5 (см. табл. 2, столбец 11).

Повышение среднего количества осадков исследуемого региона по ансамблю CMIP6 будет происходить неравномерно на протяжении XXI в. по результатам разных экспериментов SSP (см. рис. 2). Так, в соответствии с проекцией SSP1-2.6, при которой произойдет существенное сокращение эмиссии парниковых газов в атмосферу, увеличение количества осадков региона Белого моря остановится с середины XXI в. (см. рис. 2, зеленый график). Это же, но в меньшей степени, характерно и для проекции SSP2-4.5 (см. рис. 2, синий график). Для сценария SSP3-7.0 продолжится современное, близкое к линейному повышение количества осадков (см. рис. 2, оранжевый график). При экстремальном сценарии SSP5-8.5 количество осадков в регионе Белого моря на протяжении XXI в. будет увеличиваться с нарастанием (см. рис. 2, сиреневый график).

Ансамбль 32 моделей CMIP6 демонстрирует неоднородное по пространству увеличение количества осадков в регионе Белого моря к концу XXI в. — с более высокими значениями повышения на севере, чем на юге (рис. 4). Причем наибольшее увеличение количества осадков будет происходить на северо-западе и северо-востоке исследуемого региона. Так, по сценарию SSP5-8.5 увеличение среднего количества осадков за сутки между 1994—2023 и 2070—2099 гг. на северо-западе и северо-востоке региона составит приблизительно +0,3 мм/сут и +0,2 мм/сут на юге (рис. 4d). Для сценария SSP1-2.6 этот контраст между севером и югом существенно меньше (рис. 4a).

Закключение

По данным десяти метеостанций региона Белого моря, произошло увеличение количества осадков за период 1991—2020 гг. по сравнению с 1961—1990 гг., максимум приходится на июль-август. Из общей картины выбиваются станции Канин Нос и Святой Нос, которые находятся на мысах, далеко вдающихся в море. Минимум для всех станций растянут на несколько месяцев и отмечается в конце зимы — начале весны. Наибольшие изменения произошли в пунктах Мезень, Архангельск, где количество осадков увеличилось, и на станции Святой Нос, где количество осадков уменьшилось. В сезонном аспекте наибольший рост в последние годы выражен весной — в начале лета и также отчетливо проявляется зимой для всех станций исследуемого региона за исключением станций Канин Нос и Святой Нос.

Результаты реанализов ECMWF ERA5, NOAA PREC и NASA MERRA-2 показали хорошую согласованность в изменениях общего количества осадков региона Белого моря (55—70° с. ш. и 25—65° в. д.). Все они демонстрируют повышение начиная приблизительно с 1980-х годов при высокой межгодовой изменчивости, мешающей сделать точную оценку этого междесятилетнего увеличения.

Результаты эксперимента Historical ансамбля 32 моделей CMIP6 подтверждают начавшееся в середине 1980-х увеличение общего количества осадков исследуемого региона. По данным моделей CMIP6, в 2024—2053 гг. среднесуточное количество осадков в регионе Белого моря увеличится на $+0,07 \pm 0,05$ мм/сут по сравнению с 1994—2023 гг. в малой зависимости от эксперимента SSP.

Ансамбль 32 моделей CMIP6 демонстрирует неоднородное по пространству увеличение количества осадков в регионе Белого моря к концу XXI в. — с более высокими значениями роста на севере, чем на юге. Наибольшее увеличение будет происходить на северо-западе и северо-востоке исследуемого региона. По сценарию SSP5-8.5 увеличение среднего количества осадков за сутки между 1994—2023 и 2070—2099 гг. на северо-западе и северо-востоке исследуемого региона составит приблизительно +0,3 мм/сут и +0,2 мм/сут на юге. Для сценария

SSP1-2.6 этот контраст между севером и югом существенно меньше.

Финансирование

Данное исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН по теме № FMEN-2021-0004 «Комплексные исследования Белого моря и водосбора в интересах развития Арктической зоны РФ».

Литература/References

1. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Geneva, Switzerland, 2023, pp. 35—115. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
2. Белое море: Справочник «Проект “Моря России”». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. — Т. 2. — Вып. 1: Гидрометеорологические условия. — Л.: Гидрометеоздат, 1991. — 240 с.
3. The White Sea: Directory “Project ‘Russian Seas’”. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 2. Iss. 1. Hydrometeorological conditions. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991, 240 p. (In Russian).
4. Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen O. M., Pettersson L. H., Bobylev L. P. White Sea, its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change. London, Springer-Praxis, 2005, 472 p.
5. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Терзевика. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. — 335 с.
6. The White Sea and its catchment area under the influence of climatic and anthropogenic factors. Ed. by N. N. Filatov, A. Yu. Terzhevik. Petrozavodsk, KarRC RAS, 2007, 335 p. (In Russian).
7. Васильев Л. Ю., Водовозова Т. Е. Система Белого моря. — Т. 1: Природная среда водосбора Белого моря. — М.: Науч. мир, 2010. — С. 16—40.
8. Vasiliev L. Yu., Vodovozova T. E. The White Sea System. Vol. 1. Natural environment of the White Sea catchment area. Moscow, Nauchnyi mir, 2010, pp. 16—40. (In Russian).
9. Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Дружинин П. В. Влияние климатических и антропогенных факторов на состояние системы «Белое море — водосбор» // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. Океанология. — 2019. — № 9. — С. 30—50. — DOI: 10.17076/lim1117.
10. Filatov N. N., Nazarova L. E., Druzhinin P. V. Influence of climatic and anthropogenic factors on the state of the “White Sea — catchment” system. Proceedings of Karelian Research Center of Russian Academy of Science. Ser. Limnology. Oceanology, 2019, no. 9, pp. 30—50. DOI: 10.17076/lim1117. (In Russian).
11. Толстиков А. В. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря. — М.: ГЕОС, 2016. — 212 с.

Tolstikov A. V. Variability of the surface layer temperature of the White Sea. Moscow, GEOS, 2016, 212 p. (In Russian).

8. Назарова Л. Е. Современные климатические условия водосбора Белого моря // Изв. РГО. — 2017. — Т. 149, вып. 5. — С. 16—24.

Nazarova L. E. Modern climatic conditions of the White Sea catchment. News of the Russian Geographical Society, 2017, vol. 149, iss. 5, pp. 16—24. (In Russian).

9. Серых И. В., Толстиков А. В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980—2021 гг. — Ч. 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.

Serykh I. V., Tolstikov A. V. Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980—2021. Pt. 1. Air temperature, precipitation, wind. Problemy Arktiki i Antarkтики, 2022, vol. 68, no. 3, pp. 258—277. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277. (In Russian).

10. Серых И. В., Толстиков А. В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980—2021 гг. — Ч. 2: Температура почвы, снег, влажность // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2022. — Т. 68, № 4. — С. 352—369. — DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369.

Serykh I. V., Tolstikov A. V. Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980—2021. Pt. 2. Soil temperature, snow, humidity. Problemy Arktiki i Antarkтики, 2022, vol. 68, no. 4, pp. 352—369. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369. (In Russian).

11. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году. — М.: Минприроды России, 2024. — 711 с.

State report on the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2023. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia, 2024, 711 p. (In Russian).

12. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. — СПб.: Научное. технологии, 2022. — 124 с.

Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. St. Petersburg, High technology, 2022, 124 p. (In Russian).

13. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. — М., 2024. — 104 с.

Report on climate features in the Russian Federation for 2023. Moscow, 2024, 104 p. (In Russian).

14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. Q. J. R. Meteorol. Soc., 2020, no. 146, pp. 1999—2049.

15. 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.

16. Chen M., Xie P., Janowiak J. E., Arkin P. A. Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations. J. of Hydrometeorology, 2002, 3, pp. 249—266.

17. O'Neill B. C., Tebaldi C., van Vuuren D. P. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (Scenario-MIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development, 2016, vol. 9, pp. 3461—3482.

18. Riahi K., van Vuuren D. P., Kriegler E. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change, 2017, vol. 42, pp. 153—168.

19. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geosci. Model Dev., 2016, vol. 9, pp. 1937—1958.

20. Серых И. В., Толстиков А. В. Климатические изменения температуры воздуха западной части российской Арктики в 1940—2099 гг. по данным ERA5 и моделям CMIP6 // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 334—349. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-334-349.

Serykh I. V., Tolstikov A. V. Climatic changes in air temperature in the western part of the Russian Arctic in 1940—2099 according to ERA5 data and CMIP6 models. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 334—349. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-334-349. (In Russian).

21. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год. — М.: Росгидромет, 2024. — 215 с.

Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2023. Moscow, Roshydromet, 2024, 215 p. (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, д. 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., д. 36), e-mail: iserykh@ocean.ru.

CLIMATE CHANGES IN PRECIPITATION IN THE WHITE SEA AREA AND THEIR CALCULATION USING CMIP6 MODELS UP TO 2099

Tolstikov, A. V.¹, Serykh, I. V.²

¹ Northern water problems institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

² Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

For citing

Tolstikov A. V., Serykh I. V. Climate changes in precipitation in the White Sea area and their calculation using CMIP6 models up to 2099. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 30—41. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-30-41. (In Russian).

The article was received on February 3, 2025

Abstract

The authors have studied climate changes in precipitation in the western Russian Arctic (55—70° N and 25—65° E). To analyze the changes that occurred during the period of instrumental observations, they use data from weather stations. Additionally, they reanalyze the ERA5, PREC and MERRA-2 results. The weather station data and reanalysis are generally consistent with each other and demonstrate an increase in precipitation in the region under study. At the same time, both spatial and temporal heterogeneity of the changes that have occurred are observed. Thus, according to ERA5 data, one of the regions with the greatest increase in average daily precipitation between 1940—1969 and 1994—2023 is the White Sea water area (+0.2 mm/d). It is shown that the results of the Historical ensemble experiment of 32 CMIP6 models also demonstrate an increase in average daily precipitation. Thus, between 1940—1969 and 1994—2023 it is +0.08±0.05 mm/d. Moreover, according to the ensemble of 32 CMIP6 models, the increase in precipitation began in the 1980s and continues to the present day. Future changes in precipitation until the end of the 21st century are considered based on the results of the Shared Socio-economic Pathways (SSP) experiments of the ensemble of 32 CMIP6 models, which shows a further increase in precipitation in the White Sea region. Thus, the increase in average daily precipitation in 2070—2099 as compared to the period 1994—2023 will be +0.11±0.08, +0.16±0.09, +0.21±0.10, +0.27±0.11 mm/d according to the results of the SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 experiments, respectively. Thereby, by the end of the 21st century, a more significant increase in precipitation is expected in the north of the region under study than in its south. In the next 30 years, according to the ensemble of CMIP6 models, the average daily precipitation in the White Sea region will increase by +0.07±0.05 mm/d, with little dependence on the SSP scenario.

Keywords: climate change, Arctic, precipitation, White Sea, CMIP6 models, SSP experiments.

Funding

This study was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Northern water problems institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences on topic No.FMEN-2021-0004 “Comprehensive studies of the White Sea and watershed for the development of the Arctic zone of the Russian Federation.”

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 Ave., 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, Nakhimovskii Ave., Moscow, Russia, 117997), e-mail: iserykh@ocean.ru.

© Tolstikov A. V., Serykh I. V., 2025