

DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-334-349

УДК 551.583

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В 1940—2099 ГГ. ПО ДАННЫМ ERA5 И МОДЕЛЯМ CMIP6

И. В. Серых¹, А. В. Толстикова²¹ ФГБУН Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)² ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2024 г.

Для цитирования

Серых И. В., Толстикова 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.

Исследованы климатические изменения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в регионе западной части российской Арктики (60—80° с. ш., 30—90° в. д.). Для анализа произошедших за 1940—2023 гг. изменений ПТВ использованы данные реанализа ERA5 и результаты эксперимента Historical моделей CMIP6. Будущие изменения ПТВ до конца XXI в. рассмотрены по результатам экспериментов SSP моделей CMIP6. Показан рост средней ПТВ исследуемого региона на 2—4°C примерно с середины 1970-х по 2023 г. Причем этот рост ПТВ заметнее всего проявился в Белом и Карском морях, а также на севере и востоке Баренцева моря. Модели CMIP6 на основе различных сценариев выбросов парниковых газов дают заметно различающиеся прогнозы повышения ПТВ исследуемого региона до конца XXI в. Так, в зависимости от сценария увеличения ПТВ западной части российской Арктики к концу XXI в. может составить от 2—4°C до 6—10°C с более сильным ростом ПТВ на севере исследуемого региона. При этом в малой зависимости от будущего сценария модели CMIP6 прогнозируют, что в ближайшие 30 лет средняя ПТВ западной части российской Арктики вырастет приблизительно на 2—3°C, причем на севере исследуемого региона ее рост может составить более 3°C, а на юге — около 2°C. Таким образом, разница средней ПТВ между севером и югом исследуемого региона сократится на протяжении XXI в. при любом из рассмотренных сценариев SSP.

Ключевые слова: изменение климата, Арктика, приповерхностная температура воздуха, Баренцево море, Белое море, Карское море, модели CMIP6.

Введение

Климат Арктики испытывает потепление на вековом масштабе, которое в последние десятилетия лишь усиливается [1; 2]. Арктическое усиление («Arctic amplification») проявляется в том, что температура в Арктике растет быстрее, чем в среднем на планете [1; 3].

Одним из индикаторов колебаний климата в высоких широтах является многолетняя изменчивость ледяного покрова Северного Ледовитого океана [4; 5]. Согласно работам [2; 6; 7], отмечается изменение количества льда в последние годы, увеличивается

повторяемость западной формы циркуляции в полярной области, смещаются сроки наблюдаемых ледовых явлений на водоемах Севера. Преимущественно продолжительность фазы ледового режима сокращается, а толщина льда становится меньше [2; 8]. Кроме этого, изменяются характеристики водного стока рек [9—11], происходит их внутригодовое перераспределение, что, в свою очередь, может отрицательно сказываться на процессах, связанных, например, с удержанием многолетней мерзлоты метана [12].

В западном секторе Арктики увеличивается температура приповерхностного слоя воздуха на фоне адвекции теплых воздушных масс из Северной Ат-

лантики. Этот процесс переноса тепла в атмосфере наряду с положительными обратными связями определяет наблюдаемое потепление [13]. Также с изменениями адвекции тепла из Северной Атлантики связано квази-15-летнее колебание температуры западной части российской Арктики [14].

В нашей работе [15] показано, что наиболее сильное увеличение температуры приповерхностного слоя воздуха в регионе (60—75° с. ш., 30—85° в. д.) за 1980—2021 гг. отмечается для ноября и апреля, что свидетельствует о произошедшем смещении границ сезонов — более позднем начале зимы и раннем ее завершении.

Последствия потепления климата в Арктике могут иметь разнонаправленные проявления в экономической и социальной сферах. С одной стороны, освобождение обширных участков Северного Ледовитого океана ото льда расширяет возможности для морского транспорта [16], добычи полезных ископаемых, туризма. С другой стороны, например, деградация многолетней мерзлоты из-за повышения температуры приземного слоя воздуха может способствовать эмиссии значительных объемов парниковых газов.

Изменения климата связывают как с антропогенным воздействием, так и с естественными колебаниями климата [1; 17]. Очевидно, что эти факторы действуют совместно и в отдельных районах Земного шара выражены по-разному [18]. Поэтому установление региональных особенностей климатически значимых процессов и их обратных связей в Арктике — актуальная задача. Важно особое внимание уделить разработкам прогностических моделей, учитывая, что недостаток данных наблюдений в Арктике усложняет их верификацию [16; 19].

Поскольку усиливающееся потепление климата Арктики проявляется и в ее российском секторе [20], целью данной работы являются анализ изменений температуры воздуха в западной части российской Арктики за период надежных инструментальных наблюдений и прогноз ее возможных изменений до конца XXI в. по результатам моделирования.

Материалы и методы

Для исследования произошедших изменений использованы среднемесячные данные приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) реанализа глобального климата и погоды пятого поколения Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) на сетке 0,25×0,25° за 1940—2023 гг. [21]. Для проверки полученных результатов использованы среднемесячные данные ПТВ NCEP/NCAR Reanalysis 1 на сетке 2,5×2,5° за 1948—2023 гг. [22] и данные метеостанций, расположенных в рассматриваемом регионе.

Производилось усреднение ПТВ для региона западной части российской Арктики (60—80° с. ш., 30—90° в. д.). При этом для учета различной площади ячеек сетки данных выполнено их умножение на косинус соответствующей широты. Данный реги-

он выбран, поскольку изменения климата в нем за 1980—2021 гг. подробно исследованы нами в работах [15; 23]. Изменения полученных временных рядов оценивались линейным и нелинейным приближениями с помощью метода наименьших квадратов. Небольшие вариации периодов, за которые производились приближения, показали, что оценки трендов оказались чувствительны к крайним значениям, на которые влияет межгодовая изменчивость. Поэтому было решено оценивать изменения ПТВ исследуемого региона с помощью разности средних значений за 30-летние периоды. Из-за достаточного большого периода усреднения этот метод менее чувствителен к межгодовой изменчивости по сравнению с методом наименьших квадратов.

Для анализа произошедших и возможных будущих изменений ПТВ использованы результаты модельных экспериментов шестого этапа Проекта сравнения совместных климатических моделей CMIP (Coupled Model Intercomparison Project — CMIP6, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov>), который организован Всемирной программой исследований климата [24]. Следует отметить, что для моделирования климата Земли название «совместная модель» уже устарело из-за наличия других блоков, отличных от блоков океана и атмосферы. Сейчас используется понятие «модель земной системы» (Earth system model — ESM). Моделирование будущего изменения климата координируется Проектом сценариев взаимного сравнения моделей (Scenario Model Intercomparison Project — ScenarioMIP) [25], в рамках которого исследуются изменения климата при различных возможных сценариях выбросов парниковых газов и изменений в землепользовании. Для проверки того, насколько хорошо модели воспроизводят произошедшие изменения ПТВ исследуемого региона, использованы результаты эксперимента Historical, в котором присутствует форсинг от исторических изменений концентрации парниковых газов, солнечной активности и извержений вулканов.

Различные сценарии будущих выбросов парниковых газов (Shared Socio-economic Pathways — SSPs) приводят к разному радиационному воздействию к концу XXI в. (показатель степени, в которой парниковые газы нагревают или охлаждают атмосферу, измеряется в Вт/м²), которое варьируется от 1,9 до 8,5 Вт/м², причем более высокие значения отражают более сильный эффект потепления климата. Для анализа выбраны сценарии SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5, охватывающие широкий диапазон неопределенностей в будущих траекториях социально-экономического и радиационного воздействия. Конкретные значения радиационного воздействия (2,6, 4,5, 7,0 и 8,5 Вт/м²) выбраны для облегчения сравнения со сценариями, используемыми в предыдущей фазе Проекта сравнения совместных климатических моделей (CMIP5) [26].

Названия организаций-разработчиков и самих рассматриваемых в данной работе 33 моделей CMIP6 представлены в табл. 1. Чтобы вклад моде-

лей был одинаков, от каждой взяты только один ее расчет. Для получения средних полей ПТВ по 33 моделям CMIP6 результаты каждой модели предварительно линейно интерполировались на единую сетку 1×1°. Результаты эксперимента Historical заканчиваются в 2014 г., в 2015 г. начинаются результаты экспериментов SSP. В случае, 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.

Для оценки будущего климата используется как ансамблевый метод, при котором прогноз осуществляется по среднему значению, подсчитанному по результатам большой выборки доступных моделей CMIP [1], так и прогноз по наиболее эффективной модели. Для определения такой модели анализируются результаты эксперимента Historical, моделирующего произошедшие изменения климата за период инструментальных наблюдений, и осуществляется выбор модели с результатами эксперимента Historical, ближе всего соответствующими реально произошедшим изменениям [27].

В данной работе мы используем ансамблевый метод, поскольку из того, что та или иная модель лучше других воспроизводит произошедшие изменения климата, не следует, что эта же модель лучше других воспроизводит и будущее климатическое состояние с заметно изменившимися физическими усло-

виями. При усреднении же по достаточно большому ансамблю различные ошибки, присутствующие в отдельных моделях, нивелируют друг друга, благодаря чему получаемый результат меньше зависит от случайностей. Однако следует принять во внимание, что при усреднении по ансамблю моделей исчезает вклад естественных колебаний климата, периоды и фазы которых в различных модельных расчетах могут не совпадать.

Поскольку номинальные значения ПТВ исследуемого региона для выбранных 33 моделей CMIP6 существенно различаются между собой и определяются особенностями этих совместных моделей климата Земли, то для анализа были использованы аномалии ПТВ. В качестве нормы, относительно которой вычислялись аномалии, выбраны первые 30 лет исследуемого периода — 1940—1969 гг. В каждом узле сетки вычислен средний годовой ход ПТВ за 1940—1969 гг., который затем вычтен из исходных среднемесячных данных для получения аномалий ПТВ. Затем среднемесячные аномалии ПТВ усреднялись для каждого года для получения годовых аномалий ПТВ в каждом узле сетки.

Результаты исследований

Средняя ПТВ западной части российской Арктики менялась неравномерно на протяжении 1940—2023 гг. (рис. 1, черная линия). Так, на протяжении приблизительно 1940—1980 гг. она в среднем была

Таблица 1. Изменения средней ПТВ в регионе (60—80° с. ш., 30—90° в. д.) по различным сценариям и 33 моделям CMIP6, °C

Table 1. Changes of average surface air temperature (SAT) in the region (60—80°N, 30—90°E) according to various scenarios and 33 CMIP6 models, °C

Организация	Модель	Изменения между 1940—1969 и 1994—2023 гг.	Изменения между 1994—2023 и 2070—2099 гг.				Изменения между 1994—2023 и 2024—2053 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	2,26	3,39	5,29	6,89	8,38	2,34	1,90	2,11	2,56
AWI	AWI-CM-1-1-MR	2,02	2,23	4,03	5,80	7,29	2,05	2,36	2,05	2,74
BCC	BCC-CSM2-MR	1,46	2,31	3,39	6,44	7,18	1,39	1,44	2,28	2,34
CAMS	CAMS-CSM1-0	1,12	1,38	2,38	3,33	4,37	1,27	0,90	1,28	0,88
CAS	CAS-ESM2-0	0,92	4,05	5,61	5,36	7,50	2,04	2,00	1,76	2,54
CAS	FGOALS-f3-L	2,49	1,84	4,09	6,48	8,03	1,69	2,60	2,14	3,30
CAS	FGOALS-g3	1,37	1,25	3,09	4,41	5,62	0,52	1,48	1,81	1,66
CCCma	CanESM5	2,64	4,19	5,98	7,96	9,10	3,36	3,22	4,00	3,94
CCCma	CanESM5-CanOE	2,89	4,05	5,57	8,23	9,37	3,19	3,64	4,06	4,09
CMCC	CMCC-CM2-SR5	1,77	2,69	4,65	5,32	6,86	1,54	1,41	1,64	2,00

Окончание табл. 1

Организация	Модель	Изменения между 1940—1969 и 1994—2023 гг.	Изменения между 1994—2023 и 2070—2099 гг.				Изменения между 1994—2023 и 2024—2053 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
CMCC	CMCC-ESM2	1,20	3,85	4,86	5,29	6,97	1,46	1,84	1,96	1,52
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1	2,77	3,38	4,94	7,29	8,55	1,49	1,74	1,15	1,44
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1-HR	2,34	3,36	4,70	6,63	7,65	2,27	2,22	2,15	2,77
CNRM-CERFACS	CNRM-ESM2-1	3,23	3,02	4,85	6,31	7,61	-0,11	0,79	0,80	2,01
CSIRO-ARCCSS	ACCESS-CM2	1,42	4,20	5,42	6,98	8,60	2,88	2,35	2,81	2,37
CSIRO	ACCESS-ESM1-5	2,29	2,52	3,88	5,00	6,06	0,58	1,74	0,63	1,69
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3	5,27	2,60	4,99	7,29	9,13	2,74	2,58	3,00	4,12
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3-Veg	4,29	3,40	5,32	7,57	9,07	1,30	2,32	1,92	3,50
INM	INM-CM4-8	0,74	1,62	3,07	4,41	5,65	0,36	1,49	0,97	1,46
INM	INM-CM5-0	1,66	1,33	3,43	4,93	5,79	1,81	1,15	1,93	2,66
IPSL	IPSL-CM6A-LR	2,82	3,09	4,86	6,40	8,30	1,58	1,93	2,12	2,10
MIROC	MIROC-ES2L	1,95	3,37	5,36	6,82	8,13	2,44	2,76	2,28	3,59
MIROC	MIROC6	1,58	3,98	5,18	6,08	7,93	2,55	2,54	2,63	2,72
MOHC	UKESM1-0-LL	2,18	6,37	8,18	10,07	12,20	4,50	4,59	4,77	5,50
MPI-M	MPI-ESM1-2-LR	1,93	1,57	3,63	5,22	6,21	1,59	2,37	1,93	1,85
MRI	MRI-ESM2-0	1,36	1,76	3,23	4,49	4,95	1,85	2,15	2,49	2,80
NASA-GISS	GISS-E2-1-G	1,18	2,58	3,14	4,64	5,00	2,19	1,98	1,43	2,22
NCAR	CESM2	1,80	2,13	2,97	4,37	6,55	2,08	1,64	1,29	2,58
NCAR	CESM2-WACCM	1,66	1,80	3,29	5,28	7,46	1,42	1,74	1,79	2,31
NCC	NorESM2-LM	1,90	0,54	2,16	3,44	5,03	0,48	0,64	0,86	0,73
NCC	NorESM2-MM	1,40	0,82	2,83	5,33	5,46	1,29	1,32	1,67	1,55
NIMS-KMA	KACE-1-0-G	2,74	4,09	5,46	7,84	9,26	3,75	4,05	4,56	5,04
NOAA-GFDL	GFDL-ESM4	0,21	1,77	3,31	4,86	5,55	1,35	2,11	1,29	1,91
Минимум		0,21	0,54	2,16	3,33	4,37	-0,11	0,64	0,63	0,73
Максимум		5,27	6,37	8,18	10,07	12,20	4,50	4,59	4,77	5,50
Стандартное отклонение		0,99	1,24	1,27	1,48	1,69	0,99	0,87	1,02	1,10
Среднее		2,03	2,74	4,34	5,96	7,30	1,86	2,09	2,11	2,56

практически постоянна, если принять во внимание, что в данной работе мы рассматриваем междесятилетние (продолжительные) климатические изменения ПТВ. Межгодовая климатическая изменчивость (изменения от года к году) температуры отдельных частей рассматриваемого региона исследована нами ранее в [28; 29]. Более того, в данной работе мы не станем рассматривать квази-15-летнее колебание ПТВ [14], поскольку это требует отдельного исследования, а сосредоточимся на более длительных (продолжительностью более 30 лет) изменениях ПТВ западной части российской Арктики.

При рассмотрении графика временного ряда годовых аномалий ПТВ западной части российской Арктики, построенного по данным ERA5 (см. рис. 1, черная линия), обращает на себя внимание то, что приблизительно в 1940—1980 гг. ПТВ не росла, а была постоянна или даже уменьшалась. Приблизительно в 1980—2000 гг. наблюдался рост ПТВ, который затем в 2000—2023 гг. существенно ускорился. Мы специально указываем круглые даты, чтобы подчеркнуть приблизительность границ между выделенными периодами, на которые оказывает сильное влияние межгодовая изменчивость ПТВ в исследуемом регионе. Таким образом, можно предположить, что на рубеже XX и XXI вв. в климатической системе западной части российской Арктики произошли существенные изменения — переход в новую фазу климата, повлекший за собой быстрый рост ПТВ [30].

Динамика за 1940—2014 гг. годовых аномалий ПТВ западной части российской Арктики по результатам эксперимента Historical 33 моделей CMIP6 (см. рис. 1, красная сплошная линия) близко повторяет аналогичный график по ERA5 (см. рис. 1, черная линия). При этом следует учесть, что из-за усреднения 33 модельных значений межгодовая изменчивость оказалась существенно снижена. Ее можно оценить для каждого года по величинам стандартных отклонений между 33 модельными значениями (см. рис. 1, красные пунктирные линии). То, что практически все изменения годовых аномалий ПТВ западной части российской Арктики по данным ERA5 (см. рис. 1, черная линия) находятся внутри границ межмодельной изменчивости (см. рис. 1, пунктирные линии), позволяет заключить, что критерий межмодельной изменчивости в одно стандартное отклонение выбран вполне корректно. Благодаря подавлению межгодовой изменчивости динамика среднемодельных годовых аномалий ПТВ (см. рис. 1, красная сплошная линия) позволяет уточнить, что рост ПТВ западной части российской Арктики начался с середины 1970-х. Интересной отличительной особенностью модельных изменений ПТВ от данных наблюдений является то, что рост ПТВ исследуемого региона по моделям является более равномерным по сравнению с ростом по ERA5. Это может быть связано с подавлением влияния мод естественной климатической изменчивости при усреднении результатов 33 моделей.

Цветными линиями на рис. 1 показаны средние значения (сплошные линии) и диапазон изменчивости (пунктирные линии) годовых аномалий ПТВ исследуемого региона по ансамблю рассматриваемых 33 моделей CMIP6 для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 за 2015—2099 гг. Границы изменчивости определялись как среднее значение ПТВ по ансамблю моделей для выбранного сценария плюс (верхняя граница) и минус (нижняя граница) одно стандартное (среднеквадратическое) отклонение годовых аномалий ПТВ этих 33 моделей CMIP6.

На рис. 1 разными цветами отмечены изменения годовых аномалий ПТВ для различных сценариев SSP, перечисленных в разделе «Данные и методика». Видно, что последняя часть (2015—2023 гг.) изменений ПТВ западной части российской Арктики по данным ERA5 хорошо согласуется с началом средних годовых аномалий ПТВ по экспериментам SSP. При этом изменения ПТВ по ERA5 в 2015—2023 гг. находятся в границах межмодельной изменчивости результатов ансамбля исследуемых 33 моделей CMIP6. Это свидетельствует о том, что в анализируемый ансамбль входит достаточное число моделей, которые довольно точно спрогнозировали быстрый рост ПТВ западной части российской Арктики в 2015—2023 гг.

Обращает на себя внимание то, что разница в средних значениях ПТВ западной части российской Арктики между различными сценариями SSP в начале модельных результатов (2015—2030 гг.) практически полностью отсутствует (см. рис. 1). Но к концу XXI в. прогнозы значений ПТВ исследуемого региона по различным сценариям SSP кардинально расходятся. При этом межмодельная изменчивость внутри одного сценария также возрастает на протяжении всего периода 2015—2099 гг. и составляет приблизительно 3—5°C для каждого из сценариев SSP.

В табл. 1 (столбец 3) приведены изменения средней ПТВ западной части российской Арктики между 30-летними периодами 1940—1969 гг. и 1994—2023 гг. для каждой из рассмотренных 33 моделей CMIP6 по экспериментам Historical и SSP2-4.5, а также их минимальные, максимальные и средние значения вместе со стандартными отклонениями. Вместо эксперимента SSP2-4.5 можно было выбрать любой другой из экспериментов SSP, поскольку их результаты практически не различаются для периода 2015—2023 гг. Модели CMIP6 показывают рост ПТВ исследуемого региона в среднем на 2°C между первыми и последними 30-летиями периода 1940—2023 гг., что хорошо согласуется с данными ERA5 (см. рис. 1, черная линия).

Оценки изменений средней ПТВ западной части российской Арктики для каждого рассмотренного сценария SSP произведены между 30-летними периодами 1994—2023 и 2070—2099 гг. (см. табл. 1, столбцы 4—7). Они показали существенные отличия роста ПТВ между сценариями SSP. Так, по сценарию SSP1-2.6 средняя ПТВ исследуемого региона вы-

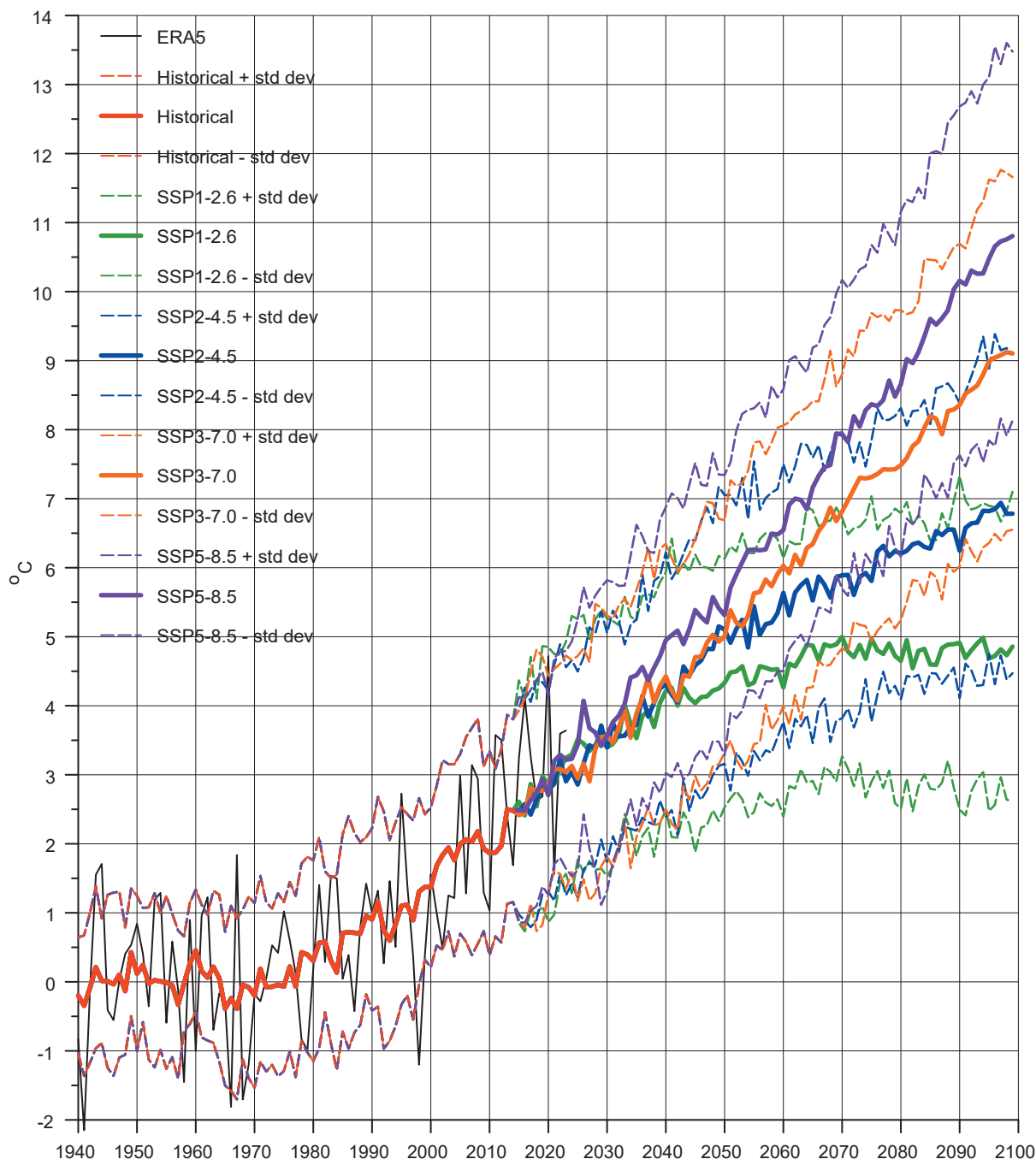


Рис. 1. Графики изменений годовых аномалий средней ПТВ западной части российской Арктики (60–80° с. ш., 30–90° в. д.) по данным ERA5 (черный) за 1940–2023 гг. и по результатам экспериментов моделей CMIP6 для сценариев: Historical (красный) за 1940–2014 гг., SSP1-2.6 (зеленый), SSP2-4.5 (синий), SSP3-7.0 (оранжевый) и SSP5-8.5 (фиолетовый) за 2015–2099 гг. Границы диапазонов изменчивости 33 моделей CMIP6 (стандартное отклонение) представлены пунктирными линиями
 Fig. 1. Graphs of changes in annual anomalies of average surface air temperature (SAT) in the western part of the Russian Arctic (60–80° N, 30–90° E) according to ERA5 data (black) for 1940–2023, and according to the results of experiments of CMIP6 models for scenarios: Historical (red) for 1940–2014, SSP1-2.6 (green), SSP2-4.5 (blue), SSP3-7.0 (orange) and SSP5-8.5 (purple) for 2015–2099. Dotted lines represent the boundaries of the variability ranges of the 33 CMIP6 models (standard deviation)

растет к концу XXI в. в среднем на 2,7°C, а по сценарию SSP5-8.5 — на 7,3°C.

Поскольку наибольший практический интерес представляют изменения климата в ближайшие десятилетия, были рассчитаны изменения средней

ПТВ западной части российской Арктики для каждого рассмотренного сценария SSP между 30-летними периодами 1994–2023 и 2024–2053 гг. (см. табл. 1, столбцы 8–11). Изменения ПТВ исследуемого региона в ближайшие 30 лет слабо различаются

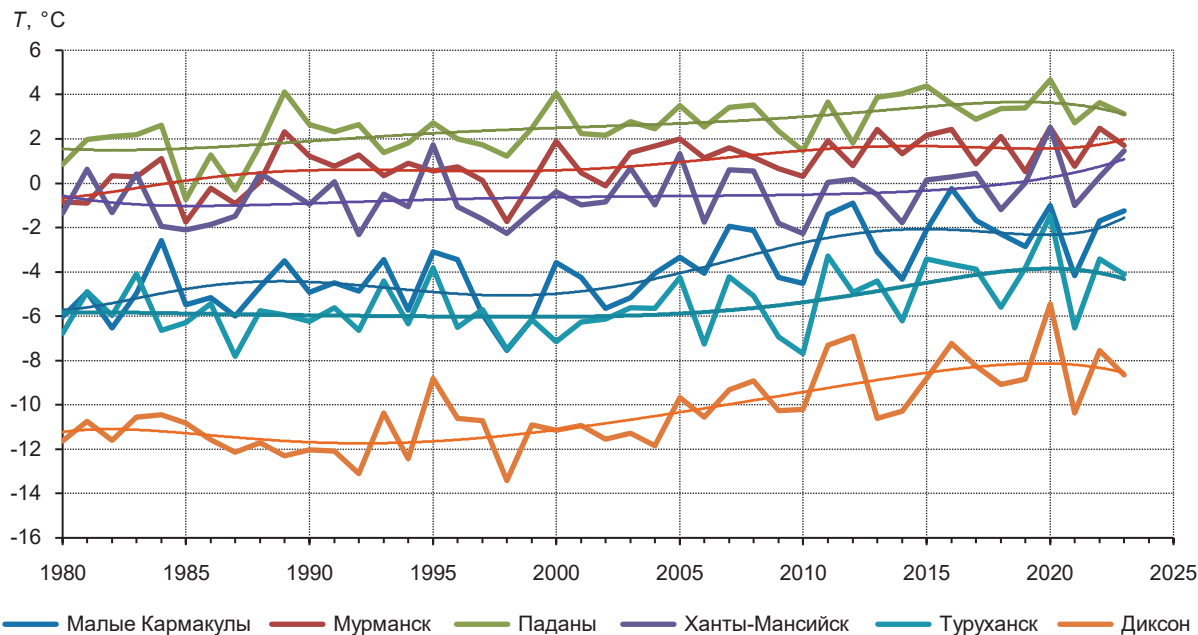


Рис. 2. График среднегодовой температуры воздуха по данным 6 метеостанций за 1980–2023 гг., их полиномиальные тренды 6-й степени и схема расположения станций
 Fig. 2. Graph of average annual air temperature according to data from 6 weather stations for 1980–2023, their 6-degree polynomial trends and station layout

для сценариев SSP: от 1,8°C для сценария SSP1-2.6 до 2,5°C для сценария SSP1-8.5 при межмодельном стандартном отклонении приблизительно 1°C.

По данным шести метеостанций за 1980–2023 гг. ПТВ исследуемого региона характеризуется положительным трендом (рис. 2). Теплые годы за период 1980–2023 гг. приходятся на конец 1980-х годов,

середины 1990-х, 2000, 2005, 2011, 2016 гг., особенно выделяется 2020 г., холодные годы — на середину 1980-х, начало и конец 1990-х, 2003, 2010, 2014, 2021 г. В этой изменчивости ПТВ отмечается квази-5-летний период. Данные реанализа ERA5 (см. рис. 1) и всех шести выбранных метеостанций хорошо согласуются друг с другом. Все тренды за

рассматриваемый период подтверждают продолжающееся потепление в исследуемом регионе.

В табл. 2 показано изменение среднемесячной и среднегодовой ПТВ в рассматриваемом регионе за 1980–2023 гг. В целом за последние годы ПТВ на 0,8°C превысила климатическую норму, наиболь-

шее потепление (в среднем на 1°C) отмечено в северной и восточной частях исследуемого региона. Цветом отмечены максимальные изменения в ПТВ за многолетний период. Для всех шести станций значения ПТВ сильнее всего выросли в марте. По среднегодовым значениям ПТВ наиболее заметное

Таблица 2. Изменения среднемесячной и среднегодовой температур воздуха в Арктической зоне за 1980–2023 гг., °C

Table 2. Changes in average monthly and average annual air temperatures in the Arctic zone for 1980–2023, °C

Пункт метеонаблюдений	Выводные характеристики	Месяц												Год
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
АЭ, Малые Кармакулы (остров Новая Земля)	T_{cp} , 1980–2023	-13,4	-13,5	-11,6	-8,7	-3,0	2,9	7,7	7,1	4,2	-1,2	-6,5	-10,0	-3,8
	\bar{T} , °C	-14,0	-14,5	-13,7	-9,7	-3,9	2,0	7,0	6,6	3,4	-2,2	-7,8	-11,2	-4,7
	Δ , °C	0,6	1,0	2,1	1,0	0,9	0,9	0,6	0,5	0,8	1,0	1,3	1,2	0,9
АЭ, Мурманск	T_{cp} , 1980–2023	-10,1	-9,4	-5,3	-0,4	4,5	9,6	13,1	11,5	7,4	1,6	-4,4	-7,8	0,9
	\bar{T} , °C	-10,1	-10,0	-6,2	-1,2	3,9	9,4	12,9	11,4	7,0	1,1	-4,2	-7,7	0,5
	Δ , °C	0,0	0,6	0,9	0,8	0,6	0,2	0,2	0,1	0,4	0,5	-0,2	-0,1	0,4
М-2, Паданы	T_{cp} , 1980–2023	-10,1	-9,6	-4,9	0,9	7,3	13,2	16,4	14,4	9,4	3,5	-2,6	-7,1	2,6
	\bar{T} , °C	-10,8	-10,6	-6,3	0,3	6,4	12,5	15,9	13,7	8,8	2,8	-2,8	-7,7	1,9
	Δ , °C	0,7	1,0	1,4	0,6	0,9	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7	0,2	0,6	0,7
ГМО, Туруханск	T_{cp} , 1980–2023	-25,6	-22,4	-14,5	-6,7	1,8	12,2	16,6	13,2	5,9	-4,4	-18,5	-23,1	-5,4
	\bar{T} , °C	-26,8	-23,6	-16,0	-8,0	0,3	10,3	16,1	12,7	5,7	-5,4	-19,4	-25,1	-6,5
	Δ , °C	1,2	1,3	1,5	1,3	1,5	1,9	0,5	0,5	0,2	1,0	0,9	2,0	1,1
АЭ, Ханты-Мансийск	T_{cp} , 1980–2023	-19,1	-16,8	-8,0	-0,4	7,9	15,3	18,3	14,6	8,0	0,6	-10,3	-16,3	-0,5
	\bar{T} , °C	-19,9	-17,5	-9,9	-0,8	6,9	14,4	17,8	14,5	8,2	-0,5	-10,6	-17,3	-1,2
	Δ , °C	0,8	0,7	2,0	0,4	1,0	0,9	0,5	0,1	-0,2	1,1	0,3	1,0	0,7
ОГМС, Диксон (остров Диксон)	T_{cp} , 1980–2023	-24,2	-24,2	-21,3	-15,8	-7,0	0,8	5,4	5,8	2,2	-6,4	-17,0	-21,8	-10,3
	\bar{T} , °C	-25,0	-25,1	-23,0	-16,8	-7,8	0,4	4,9	5,2	1,8	-7,1	-17,3	-22,2	-11,0
	Δ , °C	0,8	1,0	1,8	1,0	0,8	0,4	0,5	0,6	0,4	0,7	0,3	0,4	0,7

Примечание. \bar{T} , °C — нормы среднемесячной и годовой температур воздуха за весь ряд наблюдений на метеостанциях, полученные на сайте ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/>); Δ , °C — изменение средней температуры воздуха за 1980–2023 гг. по отношению к среднему многолетнему значению; АЭ — аэрологическая станция; ОГМС — объединенная гидрометеорологическая станция; М-2 — метеорологическая станция 2-го разряда; ГМО — гидрометобсерватория

Note. \bar{T} , °C — norms of average monthly and annual air temperatures for the entire series of observations at weather stations, obtained on the VNIIGMI-WCD website (<http://meteo.ru/>); Δ , °C — change in average air temperature for 1980–2023 in relation to the long-term average value; АЭ — aerological station; ОГМС — united hydrometeorological station; М-2 — meteorological station of the 2nd category; ГМО — hydrometeorological observatory

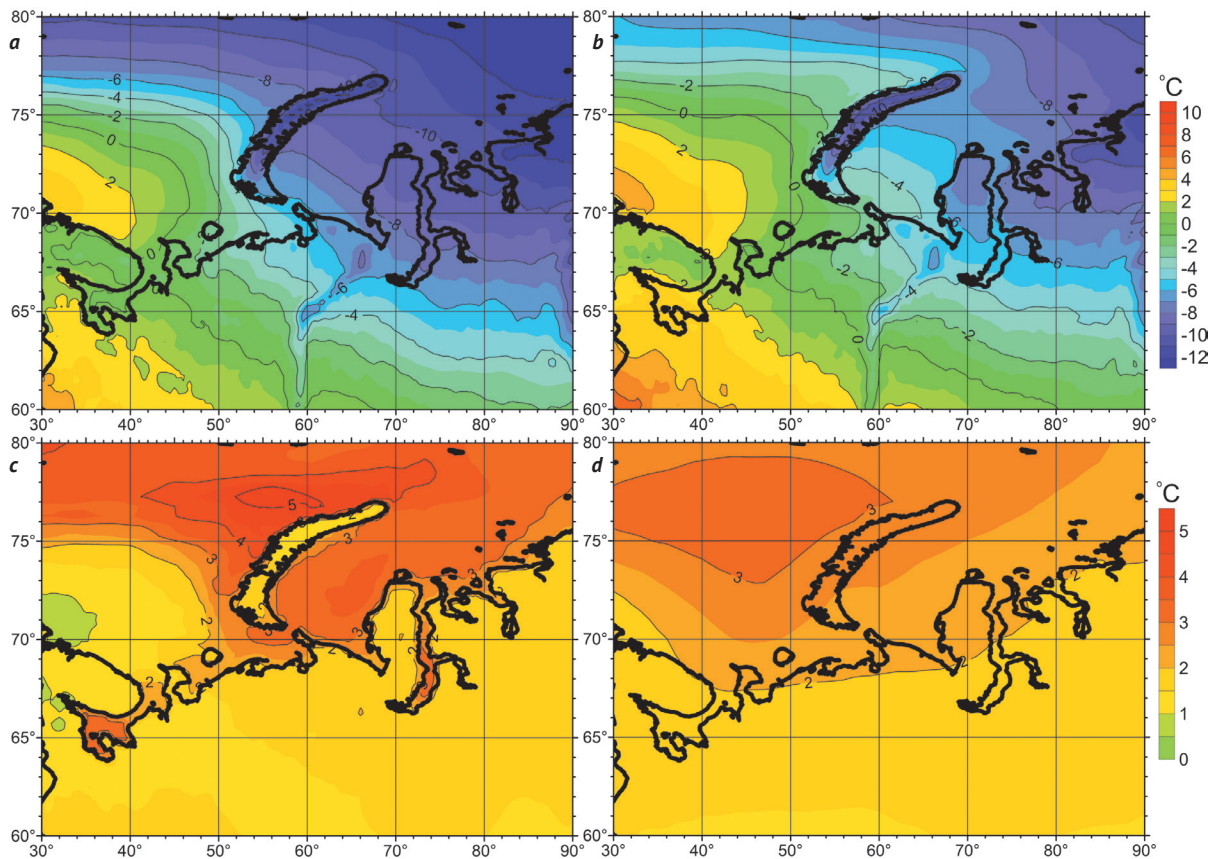


Рис. 3. Поля средней ПТВ по данным ERA5 за 1940–1969 гг. (а), за 1994–2023 гг. (б), разность между ними (с), средняя разность между этими периодами по 33 моделям CMIP6 (эксперименты Historical и SSP2-4.5) (д)
Fig. 3. Fields of average surface air temperature (SAT) according to ERA5 data for 1940–1969 (a), for 1994–2023 (b), the difference between them (c), the average difference between these periods for 33 CMIP6 models (Historical and SSP2-4.5 experiments) (d)

потепление произошло в районе станций Туруханск и Малые Кармакулы (остров Новая Земля).

ПТВ западной части российской Арктики изменялась на протяжении 1940–2023 гг. неравномерно не только по времени, но и по пространству (рис. 3). Так, наибольший рост ПТВ (приблизительно на 3°C) между первыми (см. рис. 3а) и последними (см. рис. 3б) 30 годами этого периода произошел на северо-востоке Баренцева моря, а также в Белом и Карском морях (см. рис. 3с). По всей видимости, это связано с сокращением площади морского льда в этих акваториях в конце XX и начале XXI в. [30]. Стоит отметить, что среднее по 33 моделям CMIP6 поле изменений ПТВ между 1940–1969 и 1994–2023 гг. по экспериментам Historical и SSP2-4.5 (см. рис. 3д) оказалось достаточно близко к аналогичному полю по данным ERA5 (см. рис. 3с). Данный факт свидетельствует о хорошем воспроизведении моделями CMIP6 изменений ПТВ, произошедших в западной части российской Арктики в 1940–2023 гг. Средние по 33 моделям CMIP6 поля изменений ПТВ между 1940–1969 и 1994–2023 гг. по другим сценариям SSP близки к полю для сценария SSP2-4.5 (см. рис. 3д), поскольку разница ПТВ между сценариями SSP в начале периода 2015–2099 гг. не

является существенной (см. рис. 1). Однако к концу периода 2015–2099 гг. она становится кардинальной (см. рис. 1 и 4).

Поле изменений средней ПТВ по 33 моделям CMIP6 между 1994–2023 гг. и 2070–2099 гг. для сценария SSP1-2.6 (рис. 4а) позволяет предположить, что в случае немедленного и существенного сокращения глобальных выбросов парниковых газов, предусмотренного сценарием SSP1-2.6, ПТВ западной части российской Арктики к концу XXI в. века вырастет по отношению к началу XXI в. приблизительно на 2–4°C со стандартным отклонением 1–2°C. При этом ни сам этот рост ПТВ (см. рис. 4а), ни его стандартное отклонение между моделями (рис. 5а) не являются равномерными по пространству. Так, согласно модельным прогнозам по сценарию SSP1-2.6, ПТВ вырастет сильнее на севере исследуемого региона (приблизительно на 4°C), но там же наблюдаются и наиболее высокие значения стандартных отклонений — около 2°C (см. рис. 5а). Следует заметить, что здесь и далее в тексте мы даем приблизительные оценки изменений ПТВ, более точные количественные оценки приведены в табл. 1. Но с учетом достаточно большой межмодельной изменчивости мы полагаем, что от

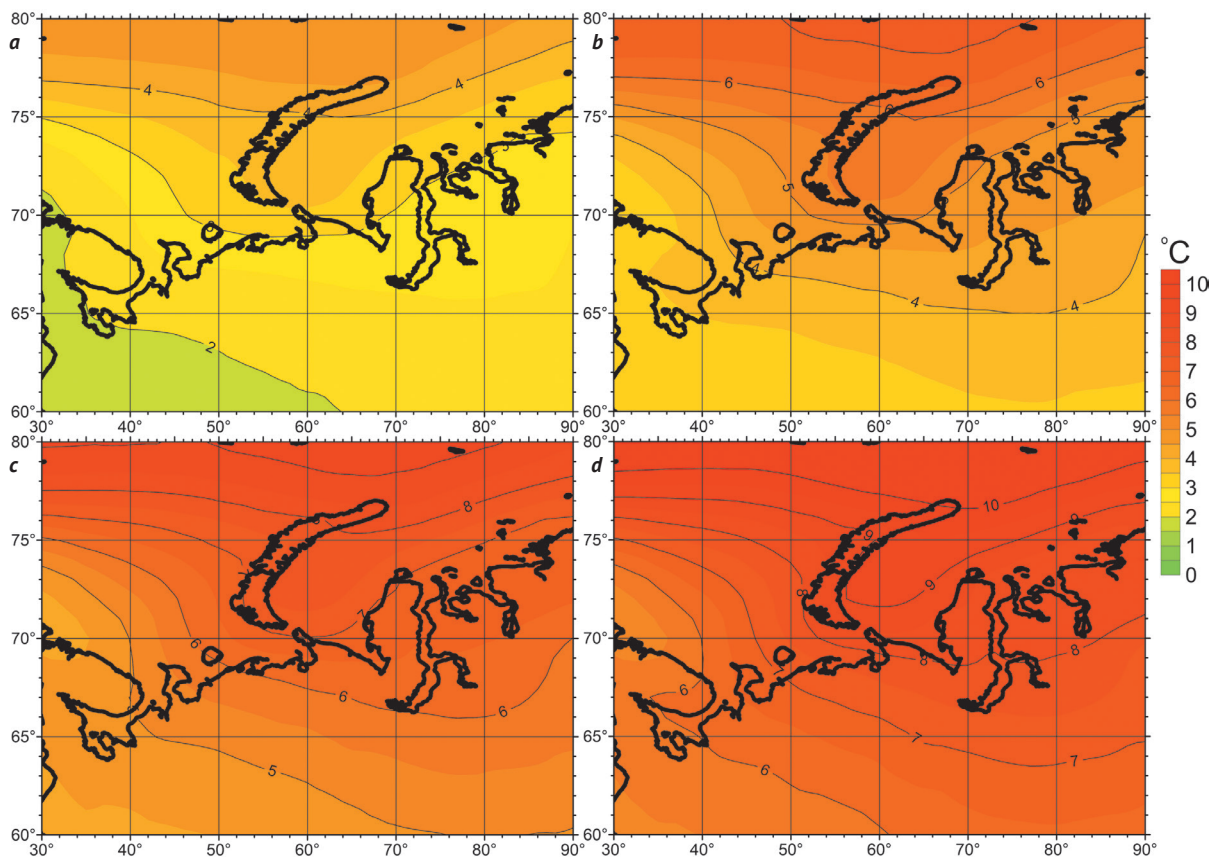


Рис. 4. Поля изменений средней ПТВ по 33 моделям CMIP6 между 1994–2023 и 2070–2099 гг. по результатам сценариев Historical и SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d)
 Fig. 4. Fields of changes in average surface air temperature (SAT) according to 33 CMIP6 models between 1994–2023 and 2070–2099 based on the results of scenarios Historical and SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d)

прогнозов по ансамблю моделей CMIP6 не следует ожидать высокой точности.

Несмотря на то что согласно сценарию SSP1-2.6 концентрация диоксида углерода CO_2 в атмосфере к концу XXI в. останется приблизительно на уровне 2020-х годов, средняя ПТВ западной части российской Арктики продолжит расти примерно до середины XXI в. (см. рис. 1) и затем стабилизируется во второй половине XXI в. Этот рост ПТВ до приблизительно 2050-х годов можно объяснить влиянием описанных ниже трех положительных обратных связей, которые уже запущены и действуют. На наш взгляд, сценарий SSP1-2.6 является наиболее оптимистичным, но наименее правдоподобным: согласно этому сценарию, глобальные выбросы CO_2 должны начать сокращаться уже в 2020-х годах, чего в настоящее время, к сожалению, не происходит.

При постепенном сокращении глобальных выбросов парниковых газов начиная с середины XXI в. (сценарий SSP2-4.5) ПТВ западной части российской Арктики вырастет к концу XXI в. более существенно (рис. 4b) по сравнению с предыдущим сценарием SSP1-2.6. Так, согласно сценарию SSP2-4.5 рост средней ПТВ в исследуемом регионе составит приблизительно 4–6°C (см. табл. 1) с величинами

около 6°C на севере и около 4°C на юге региона (см. рис. 4b). Межмодельный разброс при этом останется близким к сценарию SSP1-2.6 — около 2°C (см. рис. 5b).

Несмотря на предусмотренное сценарием SSP2-4.5 сокращение глобальных выбросов CO_2 начиная с середины XXI в., средняя ПТВ западной части российской Арктики продолжит расти вплоть до конца XXI в. (см. рис. 1), хотя во второй половине века этот рост замедлится. На наш взгляд, сценарий SSP2-4.5 более вероятен по сравнению со сценарием SSP1-2.6, поскольку он близок к тем декларациям относительно сокращения выбросов парниковых газов, которые сейчас существуют.

Сценарий SSP3-7.0 предусматривает увеличение объема глобальных выбросов парниковых газов до конца XXI в., вследствие чего их концентрация в атмосфере окажется на уровне существенно выше современного. При таком сценарии средняя ПТВ западной части российской Арктики к концу XXI в. повысится приблизительно на 5–8°C (см. табл. 1), рост ПТВ на юге исследуемого региона составит около 5°C, а на севере — около 8°C (см. рис. 4c). Межмодельный разброс при этом совсем немного выше по сравнению с предыдущими сценариями

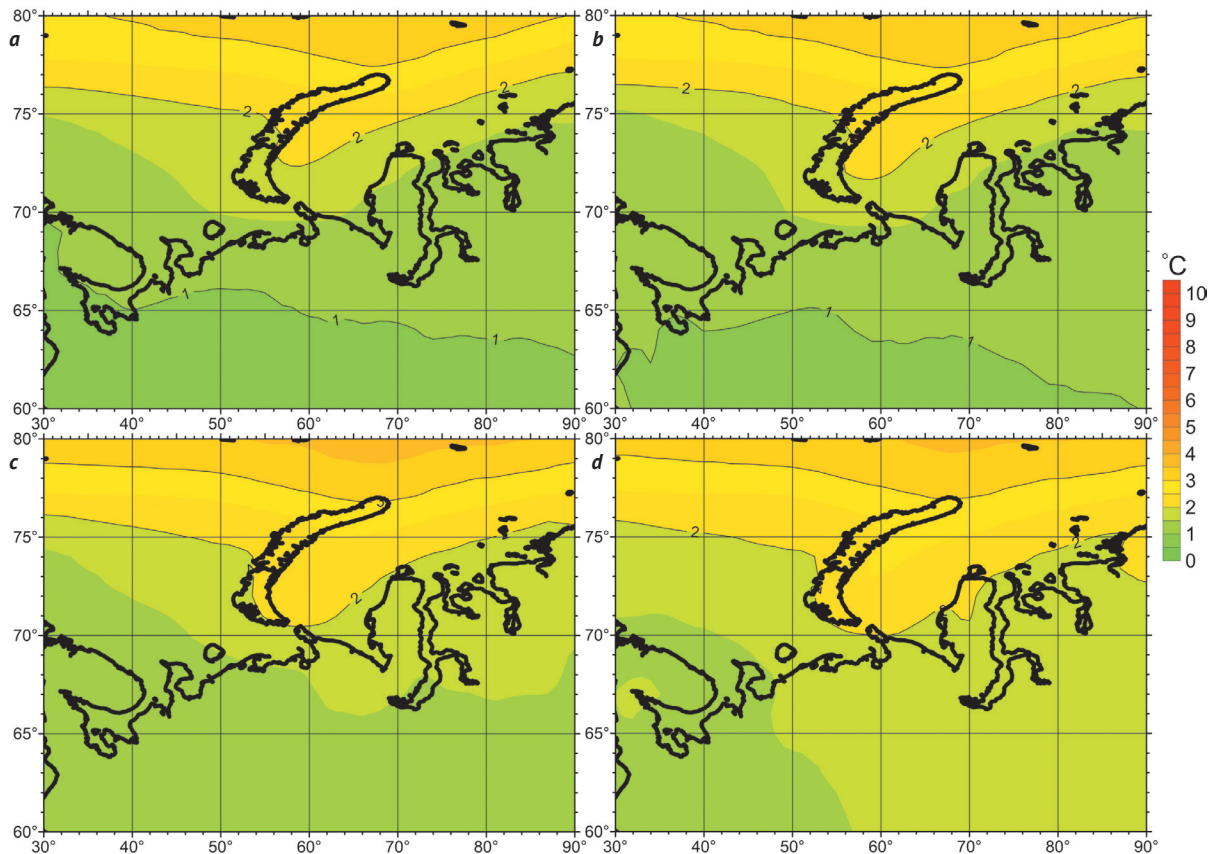


Рис. 5. Поля среднеквадратических отклонений для рис. 4
Fig. 5. Fields of standard deviations for Fig. 4

ми (см. рис. 5с). Изменения глобальных выбросов CO_2 по сценарию SSP3-7.0 являются прямым (линейным) продолжением того, что происходило во второй половине XX в. и в начале XXI в. И этот негативный, но вполне вероятный сценарий скорее всего осуществится, если не будут предприняты совместные действия по сокращению глобальных выбросов парниковых газов.

Самое быстрое увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере заложено в сценарии SSP5-8.5, что соответствующим образом повлияет на рост средней ПТВ в западной части российской Арктики к концу XXI в. — приблизительно на 6—10°C (см. табл. 1) при стандартном отклонении около 2°C. Наибольший рост ПТВ (около 10°C) произойдет на севере западной части российской Арктики, наименьший (приблизительно на 6°C) — на юге (рис. 4d). При этом межмодельный разброс (см. рис. 5d) незначительно выше по отношению к предыдущему сценарию SSP3-7.0.

Хотя сценарий SSP5-8.5 является наиболее экстремальным, на наш взгляд, он представляется вполне вероятным, если аппроксимировать прошлые изменения антропогенных выбросов CO_2 не линейной, а экспоненциальной функцией и, соответственно, экстраполировать эти будущие изменения как экспоненциальный рост.

Дополнительно были построены поля изменений средней ПТВ по 33 моделям CMIP6 между 1994—2023 гг. и 2024—2053 гг. по анализируемым сценариям SSP (рис. 6). По этим полям видно, что в ближайшие 30 лет средняя ПТВ западной части российской Арктики вырастет приблизительно на 2—3°C. Так, на севере исследуемого региона рост ПТВ может составить более 3°C, а на юге — около 2°C. Причем существенной разницы в изменениях ПТВ западной части российской Арктики в ближайшие 30 лет между различными сценариями SSP не наблюдается (см. рис. 1 и 6, табл. 1) — по всем сценариям SSP он составит 2—3°C.

Обсуждение результатов

В [15; 23] выдвинута гипотеза, что рост ПТВ западной части российской Арктики произошел из-за глобального потепления, ставшего триггером для запуска трех положительных обратных связей, действующих в исследуемом регионе и усиливающих рост ПТВ. Ниже приведено краткое описание этих трех положительных обратных связей.

Альбедная положительная обратная связь: рост ПТВ привел к увеличению температуры верхнего слоя Баренцева, Белого и Карского морей, что вызвало ускорение таяния и сокращение площади морского льда. На суше при этом произошло со-

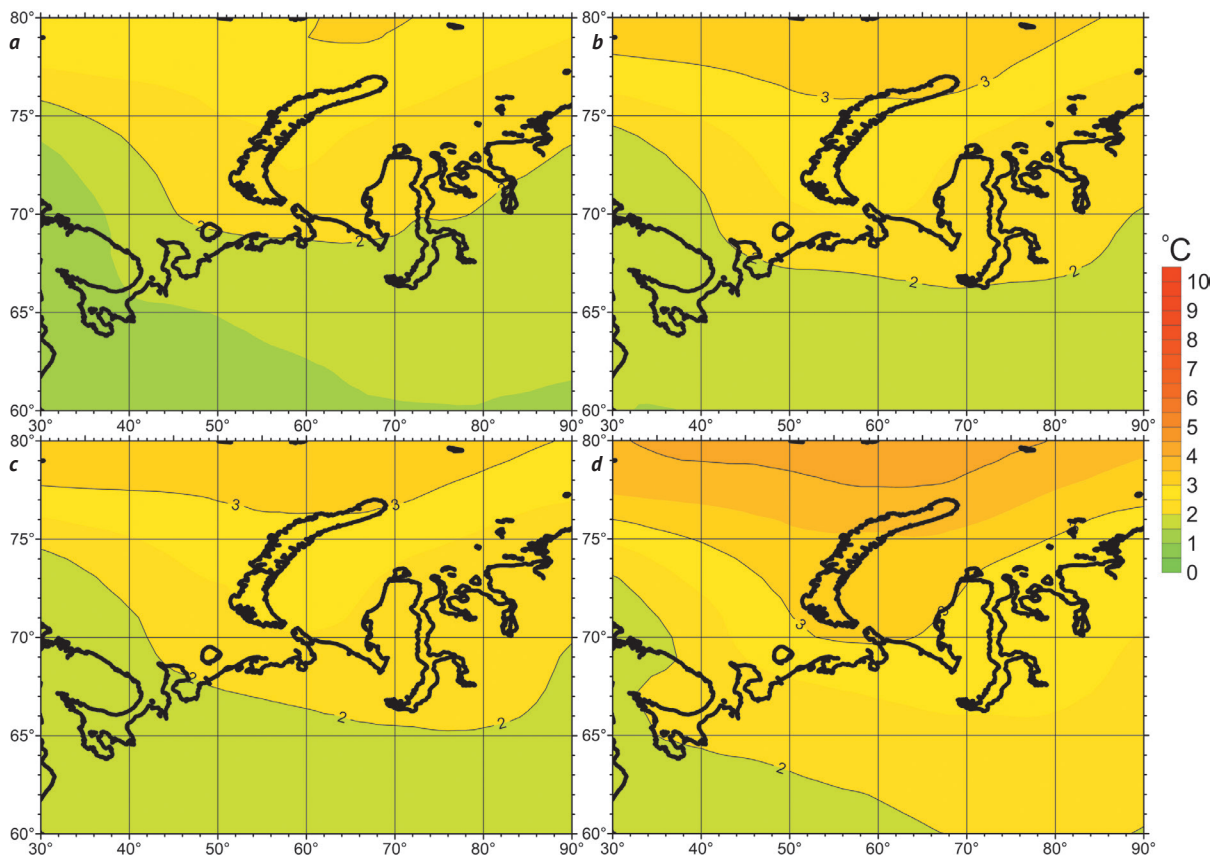


Рис. 6. Поля изменений средней ПТВ по 33 моделям CMIP6 между 1994–2023 и 2024–2053 гг. по результатам сценариев Historical и SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d).
Fig. 6. Fields of changes in average surface air temperature (SAT) according to 33 CMIP6 models between 1994–2023 and 2024–2053 based on the results of scenarios Historical and SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d).

крашение снежного покрова, из-за этих причин увеличилась площадь поверхности, свободной ото льда и снега [23], и средняя отражающая способность поверхности (альбедо) исследуемого региона уменьшилась, поглощаемое поверхностью воды и суши тепло увеличилось, что, в свою очередь, вызвало рост ПТВ западной части российской Арктики.

Положительная обратная связь с циркуляцией атмосферы: рост ПТВ вызвал изменение циркуляции атмосферы в исследуемом регионе, которая выражается в усилении южного ветра зимой и западного ветра летом [15]. Вследствие этого в западную часть российской Арктики стали чаще переноситься более теплые воздушные массы, в основном из Северной Атлантики, что увеличило адвекцию тепла в исследуемый регион и ускорило в нем рост ПТВ.

Положительная обратная связь с влажностью: рост ПТВ вызвал увеличение испарения с поверхности Баренцева, Белого и Карского морей и, как следствие, повышение влажности воздуха в исследуемом регионе [23], а поскольку водяной пар является парниковым газом, он обладает свойством высокого поглощения уходящей длинноволновой радиации, способность атмосферы задерживать уходящее от поверхности тепло возросла, и рост ПТВ западной части российской Арктики усилился.

Следует подчеркнуть, что обратная положительная связь между двумя процессами характерна тем, что оба процесса усиливают друг друга и бывает трудно определить, какой из них является первичным. В случае перечисленных трех положительных обратных связей первичным, по всей видимости, является глобальное потепление, которое и запустило самоусиливающийся посредством обратных положительных связей процесс роста ПТВ в западной части российской Арктики, наблюдаемый с середины 1970-х годов по настоящее время.

Кроме того, климатическая система Земли крайне сложна, и наряду с положительными обратными связями действуют и отрицательные. Ведь если бы в климатической системе Земли работали только положительные обратные связи, то это привело бы к экспоненциальному росту ПТВ в исследуемом регионе, чего не наблюдается (см. рис. 1). Таким образом, климат западной части российской Арктики балансируется действием и стабилизирующих отрицательных обратных связей, одной из которых является отрицательная обратная связь роста ПТВ с увеличением уходящей длинноволновой радиации из-за нагревания поверхности. Для правильного прогноза изменений климата западной части российской Арктики модели CMIP6 должны корректно

Научные исследования в Арктике

воспроизводить все перечисленные выше обратные связи.

Из полученных результатов и действия положительных обратных связей можно заключить, что продолжение роста ПТВ западной части российской Арктики в следующие несколько десятилетий является вполне вероятным. Прогноз по ансамблю моделей CMIP6 демонстрирует рост ПТВ западной части российской Арктики в ближайшие десятилетия при любом из рассмотренных сценариев SSP будущих изменений концентрации парниковых газов в атмосфере.

Недостатком полученного прогноза на несколько десятилетий вперед по ансамблю моделей CMIP6 является то, что в результатах расчетов даже одной и той же модели фазы естественных колебаний климата (мод климатической изменчивости) могут не совпадать. Более того, у разных моделей могут не совпадать периоды таких колебаний, как Атлантическое мультideкадное, Арктическое, Североатлантическое, Тихоокеанское декадное, квази-15-летнее и др., влияющих напрямую или посредством дальних связей на аномалии ПТВ западной части российской Арктики. После усреднения достаточно большого числа таких модельных результатов в итоговом среднем значении естественная климатическая изменчивость практически полностью отсутствует.

Для полученного по ансамблю моделей CMIP6 прогноза также существует проблема учета влияния возможных извержений вулканов. На изменения глобальной температуры во второй половине XX в. сильное влияние оказали извержения вулканов Агунг (1963 г.), Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1991 г.) [31]. Плохо прогнозируемые извержения крупных вулканов могут оказать существенное влияние как на глобальную температуру, так и на изменения ПТВ западной части российской Арктики.

Выводы

При освоении арктических ресурсов для экономической и социальной сферы актуально знать, как изменится региональный климат в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Рассмотрение этих изменений с учетом многолетней динамики метеорологических параметров позволяет заблаговременно подготовиться к неблагоприятному развитию событий. Важно учитывать максимально возможное количество прогнозных сценариев для ответа на вопрос, как эффективно управлять ресурсами высоких широт в будущем. Модели CMIP6 на основе различных сценариев выбросов парниковых газов вносят существенный вклад в решение этого вопроса.

Для исследования использованы среднемесячные данные ПТВ реанализа глобального климата и погоды пятого поколения Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5 за 1940—2023 гг. Для проверки полученных результатов применялись данные ПТВ шести метеостанций, расположенных в рассматриваемом регионе. Анализировались изменения средней ПТВ западной части российской

Арктики между различными периодами начиная с 1940 г. и заканчивая прогнозом вплоть до 2099 г.

Были выбраны сценарии SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5, которые охватывают широкий диапазон неопределенностей в будущих траекториях социально-экономического и радиационного воздействия.

Для сценария SSP1-2.6 характерно немедленное и существенное сокращение глобальных выбросов парниковых газов, при этом ПТВ западной части российской Арктики к концу XXI в. вырастет по отношению к началу XXI в. приблизительно на 2—4°C со стандартным отклонением 1—2°C. Сильнее всего ПТВ повысится на севере исследуемого региона (приблизительно на 4°C). Сценарий SSP1-2.6 является наиболее оптимистичным, но наименее правдоподобным.

Согласно сценарию SSP2-4.5, предусмотрено сокращение глобальных выбросов CO₂ начиная с середины XXI в. При этом средняя ПТВ западной части российской Арктики продолжит расти вплоть до конца XXI в., хотя во второй половине XXI в. этот рост замедлится. Так, согласно сценарию SSP2-4.5, рост средней ПТВ в исследуемом регионе составит приблизительно 4—6°C с величинами около 6°C на севере и около 4°C на юге региона. Данный сценарий более вероятен по сравнению с SSP1-2.6.

Сценарий SSP3-7.0 предусматривает увеличение объема выбросов парниковых газов вплоть до конца XXI в., и их концентрация в атмосфере станет значительно выше современной. При таком сценарии средняя ПТВ западной части российской Арктики к концу XXI в. повысится приблизительно на 5—8°C, рост ПТВ на юге исследуемого региона составит около 5°C и около 8°C — на севере. Изменения глобальных выбросов CO₂ по сценарию SSP3-7.0 являются прямым продолжением того, что происходило во второй половине XX в. и начале XXI в. Без принятия соответствующих мер этот сценарий вполне вероятен.

Наиболее экстремальный сценарий SSP5-8.5 предполагает самое быстрое увеличение парниковых газов в атмосфере. При его развитии ПТВ в западной части российской Арктики повысится приблизительно на 6—10°C со стандартным отклонением около 2°C. Наибольший рост ПТВ произойдет на севере западной части российской Арктики (около 10°C), наименьший — на юге региона (приблизительно на 6°C).

Согласно прогнозу по 33 моделям CMIP6 на 2024—2053 гг. средняя ПТВ западной части российской Арктики вырастет приблизительно на 2—3°C в малой зависимости от сценария SSP, причем на севере исследуемого региона рост ПТВ может составить более 3°C, а на юге — около 2°C. Таким образом, разница средней ПТВ между севером и югом исследуемого региона сократится на протяжении XXI в. при любом из рассмотренных сценариев SSP.

Полученные прогнозы по ансамблю моделей CMIP6 следует рассматривать с точки зрения пред-

сказуемости второго рода, т. е. как статистические описания будущего состояния ПТВ западной части российской Арктики при различных сценариях выбросов парниковых газов.

Финансирование

И. В. Серых выполнил данное исследование в рамках государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2024-0017 «Долгопериодная эволюция океанской циркуляции и потоков на границе океан-атмосфера и роль океана в формировании климата». А. В. Толстиков выполнил данное исследование 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. Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC. Geneva, Switzerland, 34 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

2. Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области в 2022 / Под ред. А. С. Макарова. — СПб.: ААНИИ, 2023. — 80 с.
Review of hydrometeorological processes in the Northern polar region in 2022. Ed. by A. S. Makarov. St. Petersburg, AARI, 2023, 80 p. (In Russian).

3. Moon T. A., Druckenmiller M. L., Thoman R. L. Executive Summary. NOAA Technical Report OAR ARC; 21—01. Arctic Report Card 2021, 4 p. DOI: 10.25923/5s0f-5163.

4. Миронов Е. У., Клячкин С. В., Смоляницкий В. М. и др. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики // Рос. Арктика. — 2020. — № 3 (10). — С. 13—29. — DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12102.
Mironov E. U., Klyachkin S. V., Smolyanitsky V. M., Yulin A. V., Frolov S. V. Current state and prospects for research of the ice cover of the Russian Arctic seas. Russian Arctic, 2020, no. 3 (10), pp. 13—29. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12102. (In Russian).

5. Думанская И. О. Ледовые условия морей европейской части России. — Москва; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. — 608 с.
Dumanskaya I. O. Ice conditions of the seas of the European part of Russia. Moscow; Obninsk, IG-SOTSIN, 2014, 608 p. (In Russian).

6. Букатов А. Е., Букатов А. А., Бабий М. В. Пространственно-временная изменчивость распределения морского льда в Арктике // Криосфера Земли. — 2017. — Т. 21, № 1. — С. 85—92. — DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(85-92).
Bukatov A. E., Bukatov A. A., Babiy M. V. Spatiotemporal variability of sea ice distribution in the Arctic. Cryosphere of the Earth, 2017, vol. XXI, no. 1, pp. 85—92.

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(85-92). (In Russian).

7. Druckenmiller M. L., R. L. Thoman, T. A. Moon, Eds., Arctic Report Card 2022, DOI: 10.25923/yjx6-r184.

8. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Когда наступит безледный режим регионов в Арктике? // Ученые зап. РГГМУ. — 2019. — № 56. — С. 98—109. — DOI: 10.33933/2074-2762-2019-56-98-109.
Malinin V. N., Vaynovskiy P. A. When will the regions become ice-free in the Arctic? Uchenye zapiski RGGMU, 2019, no. 56, pp. 98—109. (In Russian).

9. Магрицкий Д. В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря российской Арктики // Вод. ресурсы. — 2008. — Т. 35, № 1. — С. 3—16.
Magritsky D. V. Anthropogenic impacts on the flow of rivers flowing into the seas of the Russian Arctic. Water Resources, 2008, vol. 35, no. 1, pp. 3—16. (In Russian).

10. Nasonova O., Gusev Ye., Kovalev E. Detection and attribution of changes in streamflow and snowpack in Arctic river basins. Climatic Change, 2023, vol. 176, no. 11, pp. 148—170. DOI: 10.1007/s10584-023-03626-w.

11. Gelfan A., Kalugin A., Krylenko I. Detection, attribution, and specifying mechanisms of hydrological changes in geographically different river basins. Climatic Change, 2023, 176 (9), pp. 122—142. DOI: 10.1007/s10584-023-03557-6.

12. Birchall T., Jochmann M., Betlem P. et al. Permafrost trapped natural gas in Svalbard, Norway. Front. Earth Sci., Sec. Cryospheric Sciences, 2023, vol. 11. DOI: 10.3389/feart.2023.1277027.

13. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундамент. и прикладная климатология. — 2015. — № 1. — С. 11—26.
Alekseev G. V. Manifestation and intensification of global warming in the Arctic. Fundamental and Applied Climatology, 2015, no. 1, pp. 11—26. (In Russian).

14. 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. DOI: 10.1134/S0001433820020140. (In Russian).

15. 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 Antarktiki, 2022, vol. 68, no. 3, pp. 258—277. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258—277. (In Russian).

16. Дианский Н. А., Соломонова И. В., Гусев А. В. Оценка перспектив навигации по Северному морскому пути на основе комбинированного прогностического сценария // Тр. Гос. океанограф. ин-та. — 2018. — № 219. — С. 249—268.
- Diansky N. A., Solomonova I. V., Gusev A. V.* Assessing the prospects for navigation along the Northern Sea Route based on a combined forecast scenario. Proceedings of the State Oceanographic Institute, 2018, no. 219, pp. 249—268. (In Russian).
17. Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // Фундамент. и прикладная климатология. — 2015. — № 1. — С. 183—210.
- Panin G. N., Vyurchalkina T. Yu., Solomonova I. V.* Climatic changes in the Arctic, North Atlantic, Caspian region and their relationship. *Fundamental and Applied Climatology*, 2015, no. 1, pp. 183—210. (In Russian).
18. Vicente-Serrano S., Peña-Gallardo M., Hannaford J. et al. Climate, irrigation, and land cover change explain streamflow trends in countries bordering the Northeast Atlantic. *Geophys Res Lett.*, 2019, 46 (19), pp. 10821—10833. DOI: 10.1029/2019GL084084.
19. Chernov I., Tolstikov A. The White Sea: Available Data and Numerical Models. *Geosciences*, 2020, 10, p. 463. DOI: 10.3390/geosciences10110463.
20. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Ред. В. М. Катцов. — СПб.: Научное. технологии. — 2022. — 126 с.
- Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Ed. by V. M. Kattsov. Saint Petersburg, High technology, 2022, 126 p. (In Russian).
21. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, no. 146, pp. 1999—2049.
22. 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. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
23. 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.
- 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 Antarktiki*, 2022, 68 (4), pp. 352—369. (In Russian).
24. 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.
25. O'Neill B. C., Tebaldi C., van Vuuren D. P. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9 (9), pp. 3461—3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016.
26. Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2012, 93, pp. 485—498. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
27. Лобанов В. А., Абанников В. Н., Окуличева А. А., Григорьева А. А. Современные и будущие изменения климата Ленинградской области и их влияние на агроклиматические характеристики // Метеорология и гидрология. — 2023. — № 9. — С. 100—113.
- Lobanov V. A., Abannikov V. N., Okulichева A. A., Grigorieva A. A.* Current and future climate changes in the Leningrad region and their impact on agroclimatic characteristics. *Meteorology and Hydrology*, 2023, no. 9, pp. 100—113. (In Russian).
28. 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.
29. 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. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, 2020, no. 4, pp. 83—95. (In Russian).
30. Серых И. В., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Костяная Е. А. О переходе температурного режима региона Белого моря в новое фазовое состояние // Фундам. и прикладная гидрофизика. — 2022. — Т. 15, № 1. — С. 98—111. — DOI: 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. DOI: 10.48612/fpg/k9x4-p8fz-5kz6. (In Russian).
31. Gregory J. M., Andrews T., Ceppi P. et al. How accurately can the climate sensitivity to CO₂ be estimated from historical climate change? *Clim. Dyn.*, 2020, vol. 54, pp. 129—157. DOI: 10.1007/s00382-019-04991-y.

Информация об авторах

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.

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.

CLIMATIC CHANGES OF AIR TEMPERATURE IN THE WESTERN PART OF THE RUSSIAN ARCTIC IN 1940—2099 ACCORDING TO ERA5 DATA AND CMIP6 MODELS

Serykh, I. V.¹, Tolstikov, A. V.²

¹ Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² Northern water problems institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

The article was received on February 2, 2024

For citing

Serykh I. V., Tolstikov A. V. Climatic changes of 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).

Abstract

The study deals with the climatic changes in surface air temperature (SAT) in the western part of the Russian Arctic (60—80° N, 30—90° E). To analyze the changes in SAT that occurred over the period 1940—2023, we use data from the ERA5 reanalysis and the results of the Historical model experiment CMIP6. Future changes in SAT until the end of the 21st century we consider based on the results of SSP experiments of CMIP6 models. An increase in the average SAT of the studied region by 2—4°C is shown from approximately the mid-1970s to 2023. Moreover, this increase in SAT is most noticeable in the White and Kara Seas, as well as in the north and east of the Barents Sea. CMIP6 models based on different greenhouse gas emission scenarios produce markedly different forecasts for the increase in SAT for the region under study until the end of the 21st century. Thus, depending on the scenario, the average increase in SAT in the region under study by the end of the 21st century can range from 2—4°C to 6—10°, with stronger growth of SAT in the north of the region under study. At the same time, with little dependence on the future scenario, CMIP6 models predict that in the next 30 years the average SAT of the western part of the Russian Arctic will increase by approximately 2—3°C, and in the north of the region under study its increase may be more than 3°C, and in south — about 2°C. Thus, the difference in average SAT between the north and south of the region under study will decrease throughout the 21st century under any of the SSP scenarios considered.

Keywords: climate change, Arctic, surface air temperature, Barents Sea, White Sea, Kara Sea, CMIP6 models.

Funding

I. V. Serykh carried out this research within the framework of the state assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences on topic no. FMWE-2024-0017 “Long-term evolution of ocean circulation and flows at the ocean-atmosphere boundary and the ocean role in climate formation”. A. V. Tolstikov carried out this research within the framework of the state assignment of the Institute of Water Problems of the North of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences on topic no. FMEN-2021-0004 “Comprehensive studies of the White Sea and watershed for development of the Arctic zone of the Russian Federation.”

Information about the authors

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

Tolstikov, Aleksei 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 St., Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, 185030), e-mail: alexeytolstikov@mail.ru.

@ Serykh I. V., Tolstikov A. V., 2024