

Научная статья

УДК 551.583

DOI: 10.24412/2658-4255-2026-1-37-53



EDN: PJKTAK

Для цитирования:

Серых И.В., Трусенкова О.О., Скакун А.А. Потепление климата российской восточной Арктики по ансамблю моделей CMIP6 за 1940–2099 гг.

// Российская Арктика. 2026. Т. 8. № 1. С. 37–53.

<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2026-1-37-53>

Получена: 25.01.2026

Принята: 27.02.2026

Опубликована: 31.03.2026

For citation:

Serykh IV, Trusenkova OO, Skakun AA. Climate warming in the Eastern Russian Arctic according to the CMIP6 model ensemble for 1940–2099. Russian Arctic. 2026;8(1):37–53. (In Russ.).

<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2026-1-37-53>

Received: 25.01.2026

Accepted: 27.02.2026

Published: 31.03.2026

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Финансирование.

Работа выполнена в рамках государственных заданий: 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» и Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН по теме № 124022100079-4 «Исследование структуры и динамики вод Мирового океана в условиях современных климатических изменений».

ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА РОССИЙСКОЙ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ ПО АНСАМБЛЮ МОДЕЛЕЙ CMIP6 ЗА 1940–2099 ГГ.

И.В. Серых^{1*} , О.О. Трусенкова² , А.А. Скакун³ 

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

³ Независимая исследовательница, Санкт-Петербург, Россия




E-mail: *iserykh@ocean.ru

Аннотация

Исследованы долгопериодные изменения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) российской восточной Арктики (65 – 85° с.ш., 70° в.д. – 170 з.д.) по результатам моделирования в рамках различных сценариев, различающихся радиационным форсингом, ансамбля из 33 моделей проекта CMIP6 за 1940 – 2099 гг. Анализ основан на сравнении среднегодовой ПТВ, осредненной за 30-летние периоды 1940 – 1969 гг., 1994 – 2023 гг., 2024 – 2053 гг. и 2070 – 2099 гг. Подтверждена адекватность воспроизведения ансамблем моделей CMIP6 изменений ПТВ над изучаемым регионом в период 1940 – 2023 гг., включая пространственные особенности, что обосновывает модельные проекции ожидаемых изменений ПТВ в будущем. Этот вывод основан на сопоставлении результатов CMIP6 с полученными из реанализа ERA5, а также с наблюдениями на 6 репрезентативных метеостанциях региона. В частности, показано, что от 1940 – 1969 гг. к 1994 – 2023 гг. ПТВ выросла на 2 – 4 °С над акваторией и на 1 – 2 °С над сушей исследуемого региона. Наибольшее увеличение ПТВ произошло над Карским и Чукотским морями, а наименьшее – в горных районах суши. К середине XXI века по ансамблю моделей CMIP6 ожидается потепление российской восточной Арктики в среднем на 2,0 ± 1,0 – 2,8 ± 1,1 °С, которое слабо зависит от различных сценариев SSP. Напротив, к концу XXI века (от 1994 – 2023 гг. к 2070 – 2099 гг.) ожидается, в зависимости от радиационного форсинга, повышение средней ПТВ исследуемого региона на 3,0 ± 1,6, 4,9 ± 1,7, 6,8 ± 2,0 и 8,6 ± 2,3 °С для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5, соответственно. Это потепление демонстрируют все рассмотренные модели CMIP6, а осредненная по ансамблю пространственная картина ожидаемого увеличения ПТВ качественно соответствует потеплению, прошедшему от середины XX века к началу XXI века. Показано, однако, что ансамбль моделей CMIP6 занижает потепление над морскими акваториями и завышает над сушей.

Ключевые слова: приповерхностная температура воздуха, Арктика, Северный Ледовитый океан, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море, модели CMIP6, радиационный форсинг, сценарии SSP

CLIMATE WARMING IN THE EASTERN RUSSIAN ARCTIC ACCORDING TO THE CMIP6 MODEL ENSEMBLE FOR 1940–2099

Ilya V. Serykh^{1*} , Olga O. Trusenkova² , Aleksandra A. Skakun³ 

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

³ Independent researcher, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: *iserykh@ocean.ru



Abstract

Long-term changes of the surface air temperature (SAT) in the Eastern Russian Arctic (65 – 85° N, 70° E – 170° W) are examined, using ensemble-averaged results from 33 CMIP6 models for 1940 – 2099, in frames of the scenarios with the weak, moderate, or strong radiative forcing. The analysis is based on the annual mean SAT averaged over 30-year periods of 1940 – 1969, 1994 – 2023, 2024 – 2053 and 2070 – 2099. It is shown that the CMIP6 models ensemble adequately reproduce SAT changes, including spatial patterns, thus justifying future projections. For this purpose, the CMIP6 results are compared with those derived from the ERA5 Reanalysis and observations at six characteristic weather stations in the Eastern Russian Arctic. In particular, it is shown that from 1940 – 1969 to 1994 – 2023 SAT had increased by 1 – 2 °C and 2 – 4 °C over the land and ocean, respectively. The strongest increase occurred in the Kara and Chukchi Seas and the slightest increase occurred in the mountain land areas. On average, the warming of 2.0 ± 1.0 to 2.8 ± 1.1 °C is expected by the mid-XXI century, only slightly depending on the difference in the radiative forcing. On the contrary, the mean SAT increase of 3.0 ± 1.6 , 4.9 ± 1.7 , 6.8 ± 2.0 and 8.6 ± 2.3 °C for the SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios, respectively, is expected by the late XXI century. The warming was simulated by all CMIP6 models, without exception, while the spatial pattern based on the ensemble-averaged results qualitatively matches that obtained for the period from the mid to late XX century. It is shown, however, that the warming over the ocean (land) is underestimated (overestimated) by the CMIP6 models.

Keywords: surface air temperature, Arctic, Arctic Ocean, Laptev Sea, East Siberian Sea, Chukchi Sea, CMIP6 models, radiative forcing, SSP scenarios

Введение

В настоящее время глобальное изменение климата является одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, что делает актуальным прогнозирование климатических изменений, в том числе на длительный срок от нескольких десятилетий и больше [1]. Физически обоснованные прогнозы климата возможны на основе гидродинамического моделирования, т.е. создания моделей Земной системы (МЗС), включающих различные блоки – атмосферный, океанический, криосферный, блоки верхнего слоя почвы и биоты. Эта деятельность осуществляется под эгидой Межправительственной группы экспертов по изменению климата (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) [2]. МЗС создаются в различных организациях многих стран на основе различных подходов и параметризаций мелкомасштабных процессов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки, что отражается на качестве модельных результатов. Важной задачей является сравнение этих результатов, называемых проекциями, при моделировании будущих изменений климата, что осуществляется в настоящее время в рамках шестой фазы Проекта сравнения совместных моделей (*Coupled Model Intercomparison Project, phase 6 – CMIP6*).

Идеологией IPCC является отнесение глобального потепления климата в последние десятилетия главным образом к антропогенным выбросам парниковых газов, в первую очередь углекислого газа, что приводит к изменению радиационного баланса и накоплению тепла в климатической системе. Поэтому помимо естественных внешних факторов, влияющих на радиационный баланс (изменения солнечной радиации и поступления аэрозолей при извержениях вулканов), вводится дополнительный радиационный форсинг как добавочное поступление тепла на единицу земной поверхности за счет парниковых газов. Разработано несколько сценариев (*Shared Socioeconomic Pathways – SSPs*) для будущих условий слабого, умеренного или значительного дополнительного радиационного форсинга [3, 4], для которых проведены численные эксперименты с моделями, входящими в пул CMIP6, и на этой основе делаются проекции изменений климата до конца XXI века.

Проект CMIP6 направлен на изучение изменений климата, вызванных естественными факторами и антропогенными воздействиями. Цель — улучшить понимание прошлого, настоящего и будущего климата, а также оценить последствия изменения климата для общества и окружающей среды.

Проект CMIP6 фокусируется на трёх основных вопросах:

- Как климатическая система Земли реагирует на внешние воздействия?

- Каковы причины и последствия систематических смещённости моделей?
- Как оценить будущие изменения климата с учётом внутренней климатической изменчивости и неопределённости в сценариях?

При интерпретации модельных результатов необходимо понимать, что естественные изменения радиационного форсинга за счет извержений вулканов не учитываются в проекциях изменений климата на будущее (эксперименты *SSP*).

Важность Арктики в политическом и экономическом аспектах трудно переоценить, а происходящее в ней потепление с одной стороны открывает новые возможности, например расширение судоходства, с другой – создает угрозу для социума ввиду таяния многолетней мерзлоты, что делает актуальной оценку темпов потепления. Расчет линейных трендов показывает рост среднегодовой приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в некоторых регионах Арктики как $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет в период 1981 – 2020 гг. [5]. Данные реанализа *NASA MERRA-2*, основанного на спутниковых измерениях, показали повышение ПТВ между периодами 1980 – 2000 гг. и 2001 – 2021 гг. на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ в Карском море (в ноябре) и на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в северо-восточной части Баренцева моря (в апреле) [6]. По данным метеостанций скорость потепления в северных районах Баренцева и Карского морей за 1991 – 2020 гг. превышает $2\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет [7]. Показано, что потепление в Арктике происходило не равномерно, а двумя резкими переходами около 1986 и 1999 гг. [8].

Исследования последних лет показывают, что, начиная с последней четверти XX века, потепление в Арктике происходит примерно вдвое быстрее, чем в среднем на планете [9, 10], что названо арктическим или полярным усилением (*Arctic or polar amplification*) [11, 12] и обусловлено сложностью нелинейной климатической системы, характеризующейся положительными и отрицательными обратными связями. Механизмы, ответственные за арктическое усиление, включают в себя как локальные положительные обратные связи, в первую очередь за счет изменений альбедо [13], значительная часть которых связана с таянием морского льда [14], так и усиление переноса тепла из средних широт в полярные [15, 16]; на колебания климата в Арктике влияет также долгопериодная изменчивость в Северной Атлантике [17]. Арктическое усиление оказывает и обратное влияние, как на изменения климата умеренных широт Северного полушария [17–19], так и на глобальную атмосферную циркуляцию [20]. Арктическое усиление воспроизводится и прогнозируется в будущем климатическими моделями, хотя они и демонстрируют значительный разброс в его интенсивности и пространственно-временной картине [21–28].

По данным инструментальных наблюдений в последние десятилетия происходит потепление в российской восточной Арктике [29–32], однако в этих работах не обсуждаются изменения, произошедшие с середины XX века. Для оценки взаимосвязи с российской западной Арктикой, где, как было показано ранее [6], потепление распространяется с запада на восток, в исследуемый регион была включена восточная часть Карского моря.

В связи с изложенным, цель данной работы – произвести сравнительный анализ проекций будущих изменений ПТВ исследуемого региона до конца XXI века при различных сценариях *SSP* радиационного форсинга по результатам климатического моделирования в рамках проекта *CMIP6*. Для ее достижения авторами решена первая задача – подтвердить адекватность воспроизведения ансамблем моделей *CMIP6* изменений ПТВ над изучаемым регионом в период 1940 – 2023 гг. Для ее решения результаты моделирования сопоставлены с информацией реанализа *ERA5*, а также со сведениями, полученными при фактических метеонаблюдениях на 6 репрезентативных станциях региона. Сопоставление показало, что соответствие между рассматриваемыми оценками вполне удовлетворительно, что подтвердило целесообразность решения второй задачи, состоявшей в построении и анализе проекций изменений ПТВ до конца XXI века по различным сценариям *SSP*.

Данные и методы

Для исследования изменений ПТВ (T_a) от середины XX-го века к настоящему времени выбран современный реанализ Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*ECMWF*) *ERA5*, покрывающий период с 1940 г., с четверть градусным пространственным разрешением [33], что выше, чем у других продуктов, пригодных для климатических исследований, таких как *NASA MERRA2* [34] или *NCEP/NCAR Reanalysis* [35]. Район исследования выбран в координатах $65\text{--}85^{\circ}$ с.ш., 70° в.д. – 170 з.д., т.е. расширен на запад от общепринятой границы российской восточной Арктики (меридиана г. Дудинка, 86° в.д.), что удобно для сравнения с западной Арктикой, где, как показано ранее, потепление распространяется с запада на восток [6]. На основе среднемесячных данных ПТВ рассчитаны среднегодовые поля, поскольку годового временного разрешения достаточно для оценки межгодовой и междесятилетней изменчивости. Помимо самой среднегодовой ПТВ к анализу привлекались ее аномалии, для чего в каждом узле сетки рассчитывался средний годовой ход за 1940 – 1969 гг. согласно рекомендации

Всемирной метеорологической организации (ВМО) об использовании 30-летних периодов в качестве климатической нормы. Месячные аномалии ПТВ рассчитывались вычитанием среднего годового хода и осреднялись для каждого года, что и дало среднегодовые аномалии ПТВ.

Реанализ ERA5 ассимилирует данные метеостанций, однако для наглядности дополнительно привлечены среднемесячные данные ПТВ на шести станциях в районе исследования. Данные взяты с сайта ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru>, дата обращения 26.01.2026), а выбор метеостанций обусловлен длительностью и непрерывностью рядов наблюдений. При этом на станциях Зырянка и Туруханск имеется непрерывный ряд среднемесячных данных 1940 – 2023 гг.; на станциях Сухана и Остров Врангеля пропущено по 1 измерению в 2003 г. и 1943 г., соответственно; на станции Тикси – суммарно 4 измерения в 1957, 1964 и 1968 гг.; на станции Котельный – суммарно 4 измерения в 1950, 2001 и 2003 гг. Ввиду целей данного исследования и малого числа пропусков для их восполнения использовалась линейная интерполяция.

Для оценки возможных в будущем изменений ПТВ использованы результаты моделирования проекта CMIP6, которые осреднены по ансамблю из 33 моделей (далее – мультимодельные результаты). Как было показано [36, 37], осреднение по достаточно большому ансамблю позволяет сгладить ошибки, специфичные для разных МЗС вследствие различий в разностных схемах и параметризациях, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки, что не позволяет считать какую-либо модель наилучшей. Из-за несовпадения в различных моделях CMIP6 периодов и фаз мод естественной климатической изменчивости, в частности, Эль-Ниньо – Южного колебания (*El Nino – Southern Oscillation, ENSO*) [38, 39], осреднение по ансамблю МЗС также приводит к нивелированию влияния этих мод, что, однако, не препятствует оценке изменений на временных масштабах от половины столетия и более, сопоставимых или превышающих периоды таких мод, как Атлантическая мультидекадная осцилляция (*Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO*) [40] и Тихоокеанское декадное колебание (*Pacific Decadal Oscillation, PDO*) [41].

Для сопоставления с данными реанализа ERA5 используются результаты эксперимента *Historical CMIP6*, который охватывает период до 2014 г. В этом эксперименте задано воздействие на радиационный баланс Земли парниковых газов, антропогенных аэрозолей, солнечной активности и извержений вулканов по данным наблюдений [42]. Для оценки возможных будущих изменений ПТВ используются модельные результаты для четырех сценариев, реализованных для периода 2015 – 2099 гг. Это сценарии *SSP1-2.6*, *SSP2-4.5*, *SSP3-7.0* и *SSP5-8.5*, с величинами радиационного форсинга на конец XXI века (дополнительного поступления тепла на единицу площади) от 2,6 до 8,5 Вт/м², как указано в их названиях. В сценарии *SSP1-2.6* задается стабилизация, а затем уменьшение радиационного форсинга, в сценарии *SSP2-4.5* радиационный форсинг соответствует современному в течение всего периода интегрирования, в сценариях *SSP3-7.0* и *SSP5-8.5* радиационный форсинг увеличивается при интегрировании, причем во втором случае быстрее, чем в первом [42]. В итоге, результаты эксперимента *Historical* для 1940 – 2014 гг. дополнены результатами по сценариям *SSP* до конца XXI века (проекциями), что и позволило оценить возможные в будущем изменения ПТВ российской восточной Арктики. Для сравнения оценок по моделям CMIP6 и реанализу ERA5 результаты эксперимента *Historical* дополнены результатами по сценарию *SSP2-4.5* с 2015 г. по 2023 г. (далее эти комбинированные данные для краткости будут называться экспериментом *Historical/SSP2-4.5*).

Для упрощения в CMIP6 применена стандартизация выходных данных – результаты численных экспериментов различных моделей представлены в едином формате, что облегчает анализ данных ансамбля моделей. Переход от номинальных значений к аномалиям ПТВ позволил уменьшить влияние смещённости (систематических ошибок) некоторых моделей. Поскольку разные модели используют разные расчётные сетки, результаты численного моделирования интерполировались на единую сетку, что сделало возможным осреднение по ансамблю.

Для оценки изменений на длительных временных масштабах выполнено сравнение ПТВ, осредненной за 30-летние периоды 1940 – 1969 гг., 1994 – 2023 гг., 2024 – 2053 гг. и 2070 – 2099 гг., которые выбраны ввиду их соответствия климатической норме ВМО (30 лет) и половине 60-летних колебаний глобального климата [43]. Это позволило избежать влияния возможных значительных межгодовых аномалий ПТВ в начале и конце расчетных периодов, которые неизбежно искажают оценки линейных трендов методом наименьших квадратов. Еще одной причиной выбора 30-летнего интервала 1940 – 1969 гг. в качестве нормы, стало то, что именно эти 30 лет являются первыми из доступных в реанализе ERA5. Такому выбору также способствует стационарность на междесятилетних масштабах времени средней ПТВ исследуемого региона в 1940 – 1969 гг. (рис. 1). Данная методика

уже была применена нами к российской западной Арктике [44] и к дальневосточному региону России [45]. Как показали выполненные расчеты, оценки по линейным трендам качественно подобны полученным по принятой здесь методике, но проявляют неизбежное искажение из-за влияния сильной межгодовой изменчивости на краевые значения.

Результаты

По данным ERA5 среднегодовая ПТВ, осредненная по исследуемому региону (65 – 85° с.ш., 70° в.д. – 170 з.д.), существенно изменилась за 1940 – 2023 гг., причем эти изменения происходили неравномерно по времени (рис. 1, черная ломаная линия). С 1940 г. до приблизительно второй половины 1970-х гг. наблюдалась лишь сильная межгодовая изменчивость ПТВ, но не её междесятилетние изменения. К межгодовой изменчивости относится и продлившийся несколько лет значительный минимум ПТВ в середине 1960-х гг., который можно связать с извержением вулкана Агунг в 1963 г., приведшим к выбросу больших объемов аэрозоля, снижению инсоляции и уменьшению притока тепла. Долгопериодное увеличение средней ПТВ исследуемого региона началось приблизительно с конца 1970-х гг., после сдвига климатического режима 1978 г., который документирован для северной части Тихого океана [46], и с которым связано также начало роста ПТВ в дальневосточном регионе [45]. В российской восточной Арктике потепление ускорилось приблизительно с 2000 г., после климатического сдвига 1999 г., отмеченного в [8], после чего годовые аномалии ПТВ (по отношению к норме 1940 – 1969 гг.) оставались только положительными. Конец периода наблюдений характеризуется резкими межгодовыми колебаниями средней ПТВ: увеличением в 2020 г., когда была достигнута наибольшая годовая аномалия за весь период наблюдений (5 °C), уменьшением в 2021 г., когда аномалия составляла менее 2 °C и колебаниями вблизи значения 3 °C в 2022 и 2023 гг. (рис. 1, черная ломаная линия), что и искажает оценку изменений ПТВ линейным трендом, рассчитанным методом наименьших квадратов.

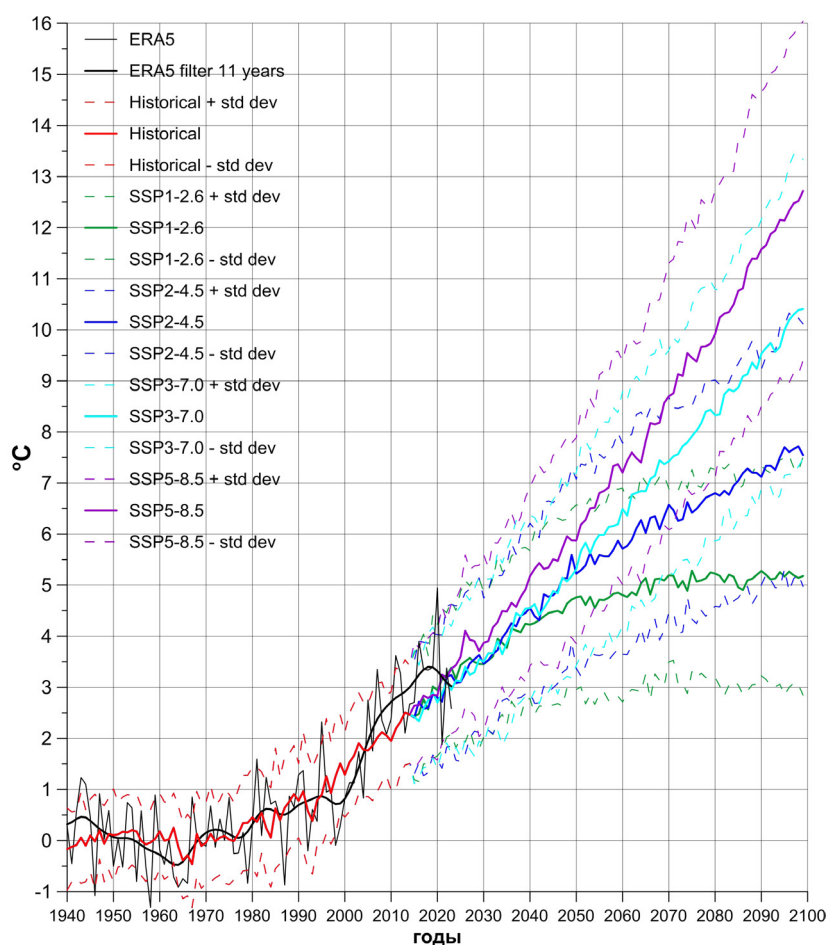


Рисунок 1. Осредненные по рассматриваемому региону (65 – 85° с. ш., 70° в. д. – 170° з. д.) среднегодовые аномалии ПТВ (°C) по данным ERA5 за 1940 – 2023 гг. (черной линией; толстой черной линией – после 11-летнего сглаживания) и средние по мультимодельному ансамблю CMIP6 для разных сценариев: Historical за 1940 – 2014 гг. (красной линией), SSP1-2.6 (зеленой линией), SSP2-4.5 (синей линией), SSP3-7.0 (голубой линией) и SSP5-8.5 (фиолетовой линией) за 2015 – 2099 гг. Стандартные отклонения по ансамблю моделей показаны пунктирными линиями. Аномалии вычислялись относительно среднего за 1940 – 1969 гг.

Средняя мультимодельная ПТВ по эксперименту *Historical* (рис. 1, красная линия) достаточно близка к сглаженной с окном 11 лет ПТВ по данным *ERA5* (рис. 1, черная гладкая линия), что объясняется подавлением межгодовой изменчивости в обоих случаях. Наличие межгодовой изменчивости в результатах отдельных моделей *CMIP6* проявляется в межмодельном среднеквадратическом разбросе, составляющем около 1,5 °C (рис. 1, пунктирные линии). Тенденции роста обоих временных рядов совпадают, а различия между ними составляют 0,1 – 0,2 °C, лишь в редкие годы достигая 0,5 °C. В средней ПТВ по эксперименту *Historical* воспроизводятся похолодания на протяжении нескольких лет после 1963, 1982 и 1991 гг., связанные с извержениями вулканов Агунг, Эль-Чичон и Пинатубо, поскольку этот форсинг заложен во всех моделях. Напротив, похолодания, связанные с двумя последними событиями (1982 и 1991 гг.), не проявляются в средней ПТВ по *ERA5*, поскольку они замаскированы потеплениями, обусловленными сильными событиями Эль-Ниньо 1982 – 1983 и 1991 – 1992 гг., вызвавшими увеличение ПТВ всего северного полушария [47]. В среднемодельном ряде ПТВ влияние событий Эль-Ниньо подавлено из-за несовпадения моментов их развития в различных модельных прогонах. От 1940 – 1969 гг. к 1994 – 2023 гг. средняя ПТВ по *ERA5* и *Historical/SSP2-4.5* возрастает на 2,1 и $2 \pm 0,73$ °C, соответственно (табл. 1). Приведенные оценки логичнее отнести к середине периода 1994 – 2023 гг., когда рост ПТВ был наиболее быстрым, т.е. к концу 2000-х гг.

Соответствие средней ПТВ по *ERA5* и *CMIP6* позволяет проанализировать ее возможные изменения в XXI веке по результатам проекций экспериментов по сценариям *SSP*. В 2015 – 2023 гг. средняя ПТВ для всех сценариев *SSP* продолжала рост в том же темпе, что и *Historical*, а различия между ними не превышали 0,1 – 0,2 °C, после чего темпы потепления стали различаться соответственно радиационному форсингу: сценарий *SSP5-8.5* дает наивысшие среди всех сценариев темпы с середины 2020-х гг., темпы по сценарию *SSP1-2.6* начинают снижаться с конца 2030-х гг., темпы по сценариям *SSP2-4.5* и *SSP3-7.0* расходятся с начала 2050-х гг. (рис. 1). Все же разница между периодами 2024 – 2053 гг. и 1994 – 2023 гг. близка к разнице между периодами 1994 – 2023 гг. и 1940 – 1969 гг., составляя 2,02 – 2,81 °C, со стандартным отклонением 0,98 – 1,16 °C в зависимости от сценария *SSP* (табл. 1).

Напротив, во второй половине XXI века ожидается усиление расхождения между сценариями *SSP* и увеличение средней ПТВ от 1994 – 2023 гг. к 2070 – 2099 гг. на $3,07 \pm 1,61$, $4,96 \pm 1,75$, $6,88 \pm 2,08$ и $8,63 \pm 2,36$ °C соответственно радиационному форсингу в сценариях *SSP1-2.6*, *SSP2-4.5*, *SSP3-7.0* и *SSP5-8.5* (табл. 1). Существенно, что увеличение средней ПТВ демонстрируют все без исключения модели *CMIP6*, а межмодельный разброс близок в сценариях *SSP1-2.6* и *SSP2-4.5*, несколько выше в *SSP3-7.0* и в полтора раза выше в сценарии *SSP5-8.5*. Ожидается, что в XXI веке ПТВ в российской восточной Арктике будет расти, в среднем, вдвое быстрее, чем в дальневосточном регионе, где к середине и концу XXI века увеличение ПТВ по ансамблю тех же моделей *CMIP6* ожидается на 1 – 1,5 и 2 – 4 °C, соответственно [45].

Таблица 1

Изменения средней ПТВ (°C) в российской восточной Арктике от 1940 – 1969 гг. к 1994 – 2023 гг. (ΔT_1), от 1994 – 2023 гг. к 2024 – 2053 гг. (ΔT_2) и от 1994 – 2023 гг. к 2070 – 2099 гг. (ΔT_3) по сценариям и моделям *CMIP6*

Организация	Модель	ΔT_1	ΔT_2				ΔT_3			
		Historical/ 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	2,50	3,26	2,93	2,98	3,63	5,04	7,12	8,99	11,15
AWI	AWI-CM-1-1-MR	2,18	1,63	2,05	1,95	2,32	2,01	3,71	5,67	7,24
BCC	BCC-CSM2-MR	1,57	1,34	1,44	2,17	2,48	2,09	3,87	6,62	7,59
CAMS	CAMS-CSM1-0	0,90	0,91	0,99	1,05	1,23	1,43	2,50	3,45	4,15
CAS	CAS-ESM2-0	1,08	2,17	1,97	1,57	2,14	4,17	5,30	5,18	7,42
CAS	FGOALS-f3-L	2,58	1,76	2,01	2,06	2,83	2,14	4,14	6,69	8,34
CAS	FGOALS-g3	1,58	0,77	1,63	2,12	1,85	1,39	3,46	5,41	6,55
CCCma	CanESM5	2,83	4,04	3,94	4,70	5,07	5,41	7,76	10,89	12,45
CCCma	CanESM5-CanOE	2,87	3,23	4,21	4,81	4,79	5,19	7,39	11,22	12,69
CMCC	CMCC-CM2-SR5	2,47	2,32	2,09	1,80	2,77	4,76	6,37	6,71	8,88
CMCC	CMCC-ESM2	1,79	2,10	2,60	2,30	2,44	5,77	6,96	7,31	9,43
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1	2,86	1,41	1,47	1,32	1,67	2,79	4,42	7,61	9,70

Организация	Модель	ΔT1	ΔT2				ΔT3			
		Historical/ 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-HR	1,77	2,09	2,09	2,03	2,51	3,01	4,83	6,76	8,02
CNRM-CERFACS	CNRM-ESM2-1	2,71	0,46	0,93	0,91	2,25	2,37	5,04	6,40	8,57
CSIRO-ARCCSS	ACCESS-CM2	1,64	2,97	3,15	3,00	3,40	4,58	6,28	8,05	10,19
CSIRO	ACCESS-ESM1-5	2,23	1,94	2,54	1,47	2,70	3,23	5,30	6,73	8,46
EC-Earth- Consortium	EC-Earth3	3,72	2,87	2,98	3,33	4,22	3,07	5,63	8,84	10,82
EC-Earth- Consortium	EC-Earth3-Veg	3,19	1,39	2,31	2,12	3,41	3,10	5,86	8,53	10,32
INM	INM-CM4-8	0,93	0,75	1,77	1,17	2,06	1,69	3,19	5,12	6,33
INM	INM-CM5-0	1,91	1,64	1,28	1,66	2,65	1,18	3,30	5,40	6,74
IPSL	IPSL-CM6A-LR	2,75	1,87	2,64	3,09	2,86	4,06	6,88	8,86	11,31
MIROC	MIROC-ES2L	1,25	2,39	2,31	2,67	3,24	3,22	5,24	6,95	8,65
MIROC	MIROC6	1,34	2,25	2,39	2,86	2,92	4,18	5,67	7,67	9,81
MOHC	UKESM1-0-LL	2,46	4,67	5,06	5,51	5,98	7,26	10,16	12,66	15,44
MPI-M	MPI-ESM1-2-LR	1,65	1,45	1,87	1,53	1,68	1,32	3,74	5,37	6,63
MRI	MRI-ESM2-0	1,72	1,85	2,46	2,78	3,04	1,69	3,69	5,74	6,55
NASA-GISS	GISS-E2-1-G	1,49	2,37	1,80	1,76	2,41	3,12	3,09	4,45	5,49
NCAR	CESM2	2,12	2,15	2,10	1,42	2,43	2,09	3,60	4,86	7,79
NCAR	CESM2-WACCM	2,32	1,08	2,03	1,92	2,24	1,76	3,68	5,60	8,64
NCC	NorESM2-LM	2,11	0,44	0,79	0,98	0,81	0,26	2,40	3,97	6,02
NCC	NorESM2-MM	1,20	1,41	1,47	1,50	1,90	1,50	3,77	5,59	6,95
NIMS-KMA	KACE-1-0-G	2,90	4,10	4,32	4,33	4,61	4,46	5,85	8,11	10,14
NOAA-GFDL	GFDL-ESM4	0,73	1,66	1,84	1,25	2,19	2,01	3,52	5,65	6,39
Среднее по ансамблю		2,04	2,02	2,29	2,31	2,81	3,07	4,96	6,88	8,63
Стандартное отклонение		0,73	1,02	0,98	1,16	1,11	1,61	1,75	2,08	2,36
Минимум по ансамблю		0,73	0,44	0,79	0,91	0,81	0,26	2,40	3,45	4,15
Максимум по ансамблю		3,72	4,67	5,06	5,51	5,98	7,26	10,16	12,66	15,44

Сценарий *SSP1-2.6* подразумевает немедленную (с 2020-х гг.) стабилизацию радиационного форсинга и его существенное уменьшение к 2075 г. за счет сокращения и затем обнуления выбросов CO_2 , что приводит к стабилизации, но не к снижению ПТВ (рис. 1). В сценарии *SSP2-4.5* радиационный форсинг (выбросы CO_2) постепенно уменьшаются, в сценариях *SSP3-7.0* и *SSP5-8.5* растут, в первом случае медленнее, чем во втором, что и обуславливает различия между проекциями. Модели *CMIP6* далеко не всегда корректно воссоздают естественные моды колебаний климата, в том числе их периоды и фазы, что подавляет их влияние при усреднении по ансамблю [38]. По этой причине в средней ПТВ по ансамблю моделей не проявляются такие моды естественной климатической изменчивости, как *ENSO*, *AMO* и *PDO*.

Пространственное распределение ПТВ в рассматриваемом регионе весьма неоднородно (рис. 2а, б). Наиболее теплыми являются юго-западный и юго-восточный районы, граничащие с западной частью Арктики и дальневосточным регионом соответственно, откуда и поступает тепло [6, 45]. Наиболее холодная зона морской поверхности находится над Северным Ледовитым океаном к северу от Чукотского моря. Наиболее холодными участками суши являются архипелаг Северная Земля (~80° с.ш., ~97° в.д.), полуостров Таймыр (70° – 77° с.ш., 80° – 100° в.д.), острова Анжу Новосибирского архипелага (~75° с.ш., 143° – 145° в.д.) и хребет Черского (~64.73° с.ш., ~143° в.д.), где среднегодовая ПТВ ниже, чем над Северным Ледовитым океаном. Зона 127° – 147° в.д. холоднее западного и восточного районов, именно здесь на 63.5° с.ш., 143° в.д., несколько южнее рассматриваемого региона, находится Оймякон – полюс холода северного полушария (эта зона для краткости далее называется районом полюса холода). В западной части региона выделяются «острова холода» – плато Путорана (66° – 70° с.ш., 90° – 99° в.д.) и Верхоянский хребет (~67° с.ш., ~129° в.д.), что, как известно,

объясняется радиационным выхолаживанием в условиях полярной ночи, особенно в горных районах.

Пространственное распределение ПТВ качественно подобно в 1940 – 1969 гг. и 1994 – 2023 гг. (рис. 2а, б), но за половину столетия во всем регионе без исключения произошло потепление, которое было значительнее над океаном, чем над сушей: изотермы поля увеличения ПТВ приблизительно следуют береговой линии (рис. 2в). Над морскими акваториями наибольшее потепление произошло над восточной частью Карского моря, т.е. на границе с российской западной Арктикой, и над Чукотским морем. Следует также отметить зону повышенного потепления (более 2,8 °С) над океаном между Северной Землей (~115° в.д.) и 155° в.д. Потепление над морской поверхностью связано с существенным сокращением площади морского льда, особенно в августе – сентябре, приводящим к уменьшению альбедо и увеличению потока тепла в океан, а возросший теплозапас морских вод, в свою очередь, приводит к увеличению потока тепла в атмосферу в холодный период года. Тем не менее, район к северу от Чукотского моря остается наиболее холодным среди морских акваторий.

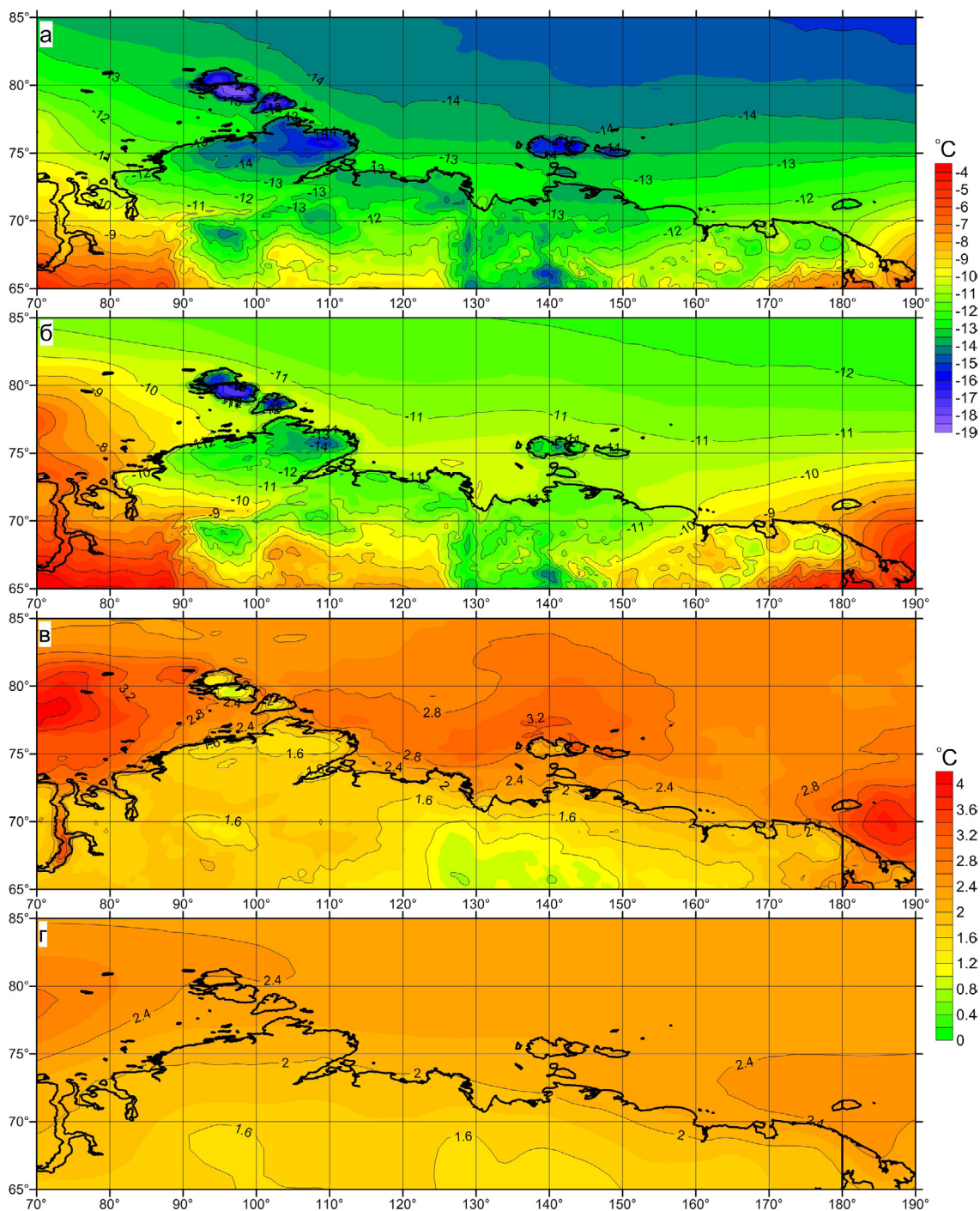


Рисунок 2. Средняя ПТВ (°С) за периоды 1940 – 1969 гг. (а) и 1994 – 2023 гг. (б), разность между ними (в) по данным ERA5 и разность ПТВ между периодами 1994 – 2023 гг. и 1940 – 1969 гг. по результатам мультимодельного ансамбля CMIP6 для эксперимента Historical/SSP2-4.5 (г)

Над сушей потепление было значительнее в тех районах, где ПТВ была изначально выше, что можно связать с более ранним сходом снежного покрова весной и более поздним его образованием осенью, благодаря чему активизируется альбедная обратная положительная связь между ПТВ и площадью снежного покрова. А самое слабое потепление было на Северной Земле и в районе полюса холода (127° – 147° в.д.). Потепление слабее и в горных районах (плато Путорана, Верхоянский и хребет Черского), где практически круглогодично лежит снежный покров, поэтому альbedo изменяется слабо. Это приводит к ослаблению альбедной положительной обратной связи и меньшему увеличению ПТВ. Аналогичная связь между потеплением, среднегодовой ПТВ и снежным покровом наблюдается и в российской западной Арктике [6, 48].

Для наглядности дополнительно рассмотрена ПТВ на шести метеостанциях, расположенных в рассматриваемом регионе. На всех станциях среднегодовая ПТВ отрицательна, а средние ПТВ за весь период 1940 – 2023 гг. заметно различаются: наибольшая ПТВ наблюдалась на юго-западной станции Туруханск, станции Остров Врангеля и Зырянка более холодные, а их характеристики близки, хотя первая гораздо севернее второй, но окружена водой, что и смягчает температурный режим (табл. 2). Станции Тикси и Сухана еще более холодные и близки по характеристикам. Самая холодная станция, Котельный, находится в Новосибирском архипелаге. Среднеквадратичный разброс ПТВ за весь период 1940 – 2023 гг. близок на всех станциях, за исключением Зырянки, где изменчивость ниже. На всех станциях наблюдаются межгодовые колебания ПТВ, а также потепление, что демонстрируется примерами статистически значимого на уровне 95 % линейного тренда для станций Туруханск и Тикси, где скорость роста ПТВ составила $0,25^{\circ}\text{C}$ и $0,29^{\circ}\text{C}$ за 10 лет соответственно (рис. 3). Темпы потепления наиболее велики на станциях Остров Врангеля и Котельный, как и в окружающих их акваториях. На этих двух станциях стандартные отклонения ПТВ увеличиваются от 1940 – 1969 гг. к 1994 – 2023 гг., т.е. изменчивость возрастает, тогда как на остальных станциях с близкими темпами потепления стандартные отклонения изменяются слабо, как и характер изменчивости.

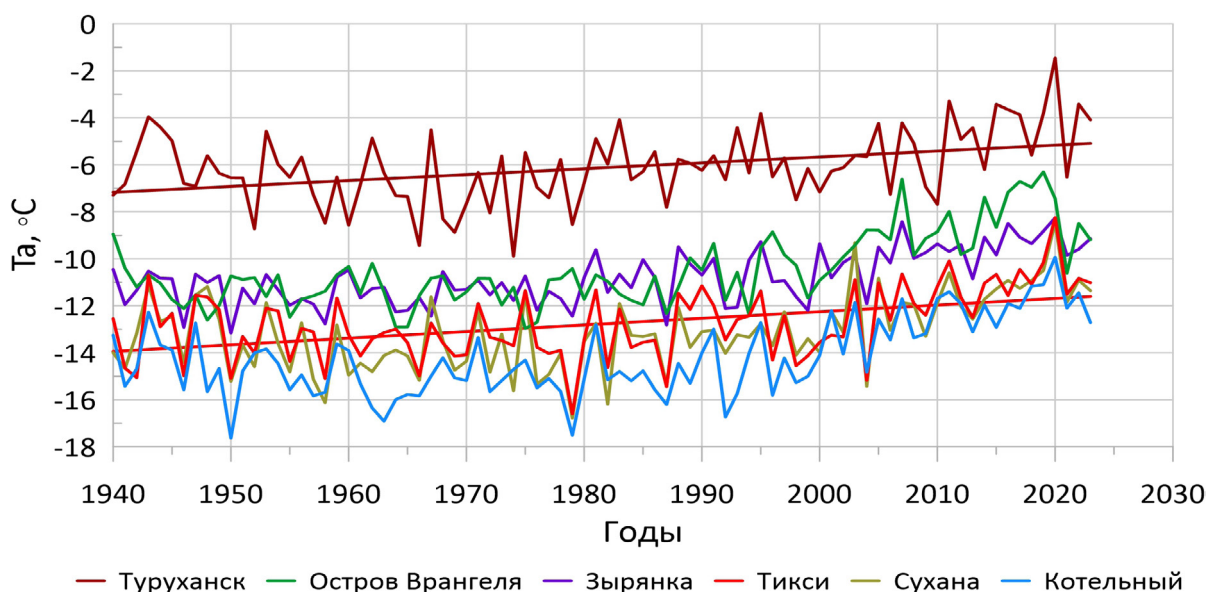


Рисунок 3. Среднегодовая ПТВ (T_a , $^{\circ}\text{C}$) по данным 6 метеостанций за 1940 – 2023 гг. Показаны статистически значимые, на уровне 95 %, линейные тренды на станциях Туруханск и Тикси

Статистические характеристики среднегодовой ПТВ ($^{\circ}\text{C}$) российской восточной Арктики по данным метеостанций. Обозначения: T_1 , T_2 , T_3 – ПТВ, осредненная за периоды 1940 – 2023 гг., 1940 – 1969 гг., 1994 – 2023 гг., σ_1 , σ_2 , σ_3 – соответствующие стандартные отклонения, ΔT – разность T_3 и T_2

Метеостанция	$T_1 \pm \sigma_1$	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	$T_2 \pm \sigma_2$	$T_3 \pm \sigma_3$	ΔT
Туруханск	$-6,1 \pm 1,5$	65,811	87,925	$-6,6 \pm 1,4$	$-5,2 \pm 1,5$	1,4
Остров Врангеля	$-10,5 \pm 1,5$	71,236	-178,589	$-11,3 \pm 0,9$	$-9,0 \pm 1,5$	2,3
Зырянка	$-10,8 \pm 1,1$	65,768	150,839	$-11,5 \pm 0,8$	$-9,9 \pm 1,0$	1,6
Тикси	$-12,8 \pm 1,5$	71,650	128,867	$-13,3 \pm 1,2$	$-11,9 \pm 1,5$	1,4
Сухана	$-13,1 \pm 1,5$	68,799	118,025	$-13,7 \pm 1,3$	$-12,1 \pm 1,4$	1,6
Котельный	$-14,2 \pm 1,5$	75,596	138,901	$-14,8 \pm 1,1$	$-12,9 \pm 1,4$	1,9

Сравнение пространственных картин потепления от 1940 – 1969 гг. к 1994 – 2023 гг. по результатам *ERA5* и *CMIP6* показывает их качественное соответствие, но существуют и определенные количественные различия (рис. 2в, г). В целом, модели *CMIP6* занижают потепление над морской поверхностью и завышают над сушей: над акваториями потепление составляет 2 – 2,8 $^{\circ}\text{C}$ для *CMIP6* в сравнении с 2,4 – 3,2 $^{\circ}\text{C}$ для *ERA5*, над сушей оценки составляют 1,5 – 2 $^{\circ}\text{C}$ и 0,8 – 2 $^{\circ}\text{C}$ соответственно, особенно бросается в глаза разница между потеплением на Северной Земле и Таймыре. Из-за более грубого пространственного разрешения моделей *CMIP6* теряются мелко-масштабные особенности, хорошо различимые в *ERA5*, но пониженное потепление на плато Путорана и в районе полюса холода все же воспроизводится. Несмотря на выявленные расхождения, можно сделать вывод о том, что результаты моделей *CMIP6* пригодны для оценки крупномасштабных особенностей потепления, ожидаемого в середине и конце XXI века.

Пространственная картина потепления, ожидаемого от начала к середине XXI века (от 1994 – 2023 гг. к 2024 – 2053 гг.) (рисунок не приводится), качественно подобна полученной по моделям *CMIP6* от середины XX века к началу XXI века (от 1940 – 1969 гг. к 1994 – 2023 гг.) (рис. 2г). Для сценариев *SSP1-2.6*, *SSP2-4.5* и *SSP3-7.0* ожидаемое увеличение ПТВ составляет 1,6 – 2,2 $^{\circ}\text{C}$ над сушей и 2,2 – 3,0 $^{\circ}\text{C}$ над акваториями, т.е. превышает полученное за вторую половину XX века на $\sim 0,2$ $^{\circ}\text{C}$ и $\sim 0,4$ $^{\circ}\text{C}$, соответственно. Для сценария *SSP5-8.5* с наибольшим радиационным форсингом ожидается более значительный рост ПТВ: на 2,0 – 2,6 $^{\circ}\text{C}$ над сушей и на 2,6 – 3,8 $^{\circ}\text{C}$ над акваториями, что соответствует различиям средней ПТВ и действию альбедной обратной связи, как обсуждалось выше. Несмотря на прогнозируемое потепление, в середине XXI века среднегодовая ПТВ останется ниже нуля над сушей (от -9 $^{\circ}\text{C}$ в районе полюса холода и до -5 $^{\circ}\text{C}$ в юго-восточном районе) и над акваторией исследуемого региона (от -7 $^{\circ}\text{C}$ до -9 $^{\circ}\text{C}$).

Пространственная картина потепления, ожидаемого от начала к концу XXI века (от 1994 – 2023 гг. к 2070 – 2099 гг.) (Рис. 4), качественно подобна полученной по моделям *CMIP6* от середины XX века к началу XXI века (рис. 2г) и от начала к середине XXI века, однако темпы увеличения ПТВ заметно выше и сильно различаются между сценариями *SSP*, увеличиваясь в полтора раза от *SSP1-2.6* к *SSP2-4.5*, вдвое к *SSP3-7.0* и втрое к *SSP5-8.5*. Особенно значительное потепление ожидается для сценария *SSP5-8.5* с наибольшим радиационным форсингом: при этом сценарии к концу XXI века в наиболее холодном северо-восточном районе над поверхностью Северного Ледовитого океана среднегодовая ПТВ становится близка к нулю, составляя около -1 $^{\circ}\text{C}$, и становится положительной над Карским и Чукотским морями. Над сушей вне района полюса холода среднегодовая ПТВ становится положительной, а в районе полюса холода – близкой к минус 4 $^{\circ}\text{C}$.

Результаты, полученные по мультимодельному ансамблю *CMIP6*, имеют место в большинстве моделей, хотя межмодельное стандартное отклонение увеличивается соответственно темпам потепления (табл. 1), составляя для сценария *SSP5-8.5* 3,5 – 4 $^{\circ}\text{C}$ и 1,8 – 2,2 $^{\circ}\text{C}$ в зонах наибольшего и наименьшего потепления, соответственно (рисунок не приводится).

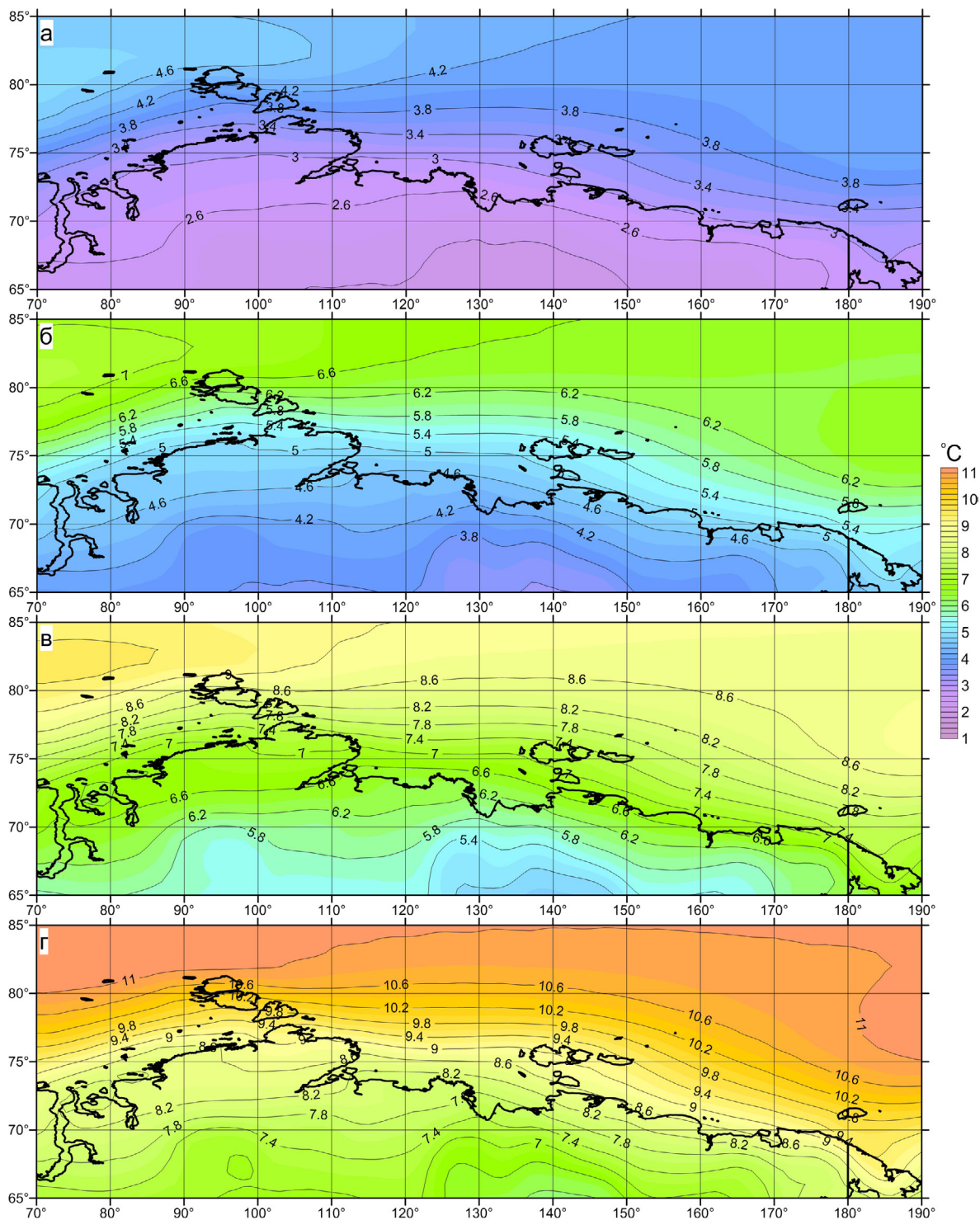


Рисунок 4. Разность ПТВ (°C) между периодами 2070 – 2099 гг. и 1994 – 2023 гг. по результатам мультимодельного ансамбля CMIP6 для сценариев SSP1-2.6 (а), SSP2-4.5 (б), SSP3-7.0 (в), SSP5-8.5 (г). Для периода 1994 – 2014 гг. использованы результаты эксперимента Historical

Заключение

Исследованы долгопериодные изменения ПТВ в российской восточной Арктике по результатам моделирования в рамках различных сценариев проекта CMIP6 за 1940 – 2099 гг. Анализировался ансамбль из 33 моделей, причем для периода 1940 – 2014 гг. использовались результаты сценария *Historical* с радиационным форсингом (дополнительным поступлением тепла на единицу площади), основанным на данных наблюдений, а для периода 2015 – 2099 гг. – результаты сценариев *SSP* с различным возможным радиационным форсингом. Анализ основан на сравнении среднегодовой ПТВ, осредненной за 30-летние периоды 1940 – 1969 гг., 1994 – 2023 гг., 2024 – 2053 гг. и 2070 – 2099 гг.

Подтверждена адекватность воспроизведения моделями *CMIP6* изменений ПТВ над изучаемым регионом в период 1940 – 2023 гг. Для этого результаты моделирования сопоставлены с информацией реанализа *ERA5*, а также со сведениями, полученными при фактических метеонаблюдениях на 6 репрезентативных метеостанциях региона.

Данные реанализа и результаты моделирования показали одинаковое по *ERA5* и *CMIP6* увеличение средней ПТВ российской восточной Арктики на ~ 2 °C от 1940 – 1969 гг. к 1994 – 2023 гг., причем рост начался после ~ 1970 г. и усилился после ~ 2000 г. Выявлены локальные минимумы ПТВ в 1963 – 1964, 1982 – 1983 и 1992 – 1993 гг., что можно связать с уменьшением инсоляции после выброса аэрозолей при извержениях вулканов Агунг, Эль-Чичон и Пинатубо, причем два последних проявились только в результатах *CMIP6*, поскольку в данных *ERA5* они замаскированы положительными межгодовыми аномалиями ПТВ всего Северного полушария из-за сильных событий Эль-Ниньо 1982 – 1983 и 1991 – 1992 гг. [47], которые были сглажены при осреднении по ансамблю 33 моделей *CMIP6*. Отклик арктического региона на события Эль-Ниньо связан с атмосферными дальними связями, приводящими к ослаблению полярного стратосферного вихря [49].

Пространственная картина потепления от середины XX века к началу XXI века качественно сходна по *ERA5* и *CMIP6*, показывая большее потепление над морскими акваториями, чем над сушей, что по данным *ERA5* составляет 2 – 4 °C и 1 – 2 °C соответственно. Отопляющее воздействие океана связано с положительными обратными связями за счет уменьшения альбедо и усиления ветра, волнения и испарения при сокращении площади морского льда. Потепление над сушей происходило быстрее в более теплых районах исследуемого региона и медленнее в более холодных, а самое слабое потепление наблюдалось в районе 127° – 147° в.д., к северу от полюса холода северного полушария в Оймяконе. Это также может быть связано с альбедной положительной обратной связью между изменениями температуры и площади снежного покрова. Данные *ERA5* с высоким пространственным разрешением показали, что в горных районах (плато Путорана, Верхоянский хребет и хребет Черского), где снег лежит большую часть года и изменения альбедо невелики, потепление также было слабым. Над морем потепление было наиболее значительно над восточной частью Карского моря, т.е. на границе с западной российской Арктикой, откуда переносится тепло [6], и над Чукотским морем, куда тепло поступает из района Берингова моря [45].

Несмотря на расхождения в некоторых деталях (ансамбль моделей *CMIP6* занижает потепление над морем и завышает над сушей), сходство результатов по *ERA5* и *CMIP6* обосновывает применение этого ансамбля 33 моделей для оценок ожидаемых изменений ПТВ до конца XXI века. Показано, что ожидаемое потепление российской восточной Арктики от 1994 – 2023 гг. к 2024 – 2053 гг. слабо различается для разных сценариев *SSP*, с увеличением средней по региону ПТВ от $2,0 \pm 1,0$ °C до $2,8 \pm 1,1$ °C. Над морской поверхностью (сушей) ожидается потепление на 2,2 – 3,0 °C (1,6 – 2,2 °C) для сценариев *SSP1-2.6*, *SSP2-4.5* и *SSP3-7.0* и на 2,6 – 3,8 °C (2,0 – 2,6 °C) для сценария *SSP5-8.5* с наибольшим радиационным форсингом, что близко к потеплению, произошедшему от середины XX века к началу XXI века. Напротив, от начала к концу XXI века повышение ПТВ исследуемого региона будет значительно выше, существенно различаясь между сценариями *SSP* и составляя в среднем $3,0 \pm 1,6$ °C, $4,9 \pm 1,7$ °C, $6,8 \pm 2,0$ °C и $8,6 \pm 2,3$ °C для сценариев *SSP1-2.6*, *SSP2-4.5*, *SSP3-7.0* и *SSP5-8.5* в соответствии с величиной радиационного форсинга. Существенно, что даже для сценария *SSP1-2.6*, с сокращением, а затем с обнулением дополнительного радиационного форсинга, накопленное тепло остается в системе со всеми последствиями для экосистемы и социума. Этот эффект был уже зарегистрирован в глобальном масштабе [2] и в дальневосточном регионе [45]. Для сценария *SSP5-8.5* к концу XXI века ожидается, что среднегодовая ПТВ будет близка к нулю над Северным Ледовитым океаном и станет положительной над Карским и Чукотским морями, а также в юго-западном и юго-восточном районах суши российской восточной Арктики, что приведет к таянию в этих районах многолетней мерзлоты.

Следует иметь в виду, что в проекциях на будущее нельзя предугадать возможные извержения вулканов, которые окажут негативное влияние на радиационный баланс, что привносит дополнительную неопределенность в полученные результаты, которые все же можно рассматривать как первое приближение к описанию будущего состояния климатической системы. При осреднении по ансамблю моделей *CMIP6* нивелируется влияние мод естественной климатической изменчивости, таких как *AMO*, *PDO* и *ENSO*, что также несколько искажает полученные оценки. Оценка влияния мод естественной климатической изменчивости на колебания ПТВ российской восточной Арктики будет предметом дальнейших исследований.

Список литературы:

1. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. 2013. С. 50–65. <https://doi.org/10.7868/s0205961413040076>
2. IPCC, 2021: Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working Group I to the Sixth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Masson-Delmotte et al. (eds.) Cambridge Univ. Press. 2023.
3. O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P. et al. The Scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific model development. 2016. Vol. 9. P. 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
4. 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. P. 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
5. Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B. et al. Exceptional warming over the Barents area. Sci. Rep. 2022. Vol. 12. 9371. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>
6. Серых И. В., Толстикова 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. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277>
7. Карандашева Т.К., Иванов Б.В., Демин В.И., Ревина А.Д., Ильющенко И.А., Анциферова А.Р. Современные тенденции изменения приземной температуры воздуха в регионе Баренцева и Карского морей // Российская Арктика. 2024. Т. 6. № 3. С. 55–64. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-3-55-64>
8. Mokhov I.I. Contemporary climate changes in the Arctic. Her. Russ. Acad. Sci. 2015. Vol. 85. P. 265–271. <https://doi.org/10.1134/S1019331615030168>
9. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 21–33. <https://doi.org/10.31857/S0002351521010119>
10. Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Commun Earth environ. 2022. Vol. 3. 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
11. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term Surface air temperature variations and modern Arctic warming. J. Climate. 2010. Vol. 23. P. 3888–3906. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>
12. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. Global and planetary change. 2011. Vol. 77. P. 85–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
13. Саркисян А.С., Мошонкин С.Н., Дианский Н.А., Гусев А.В., Багно А.В. Моделирование обратных связей климатообразующих процессов в Северном Ледовитом океане // Арктика: экология и экономика. 2013. №1(9). С. 12–23.
14. Chylek P., Folland C.K., Klett J.D., Wang M., Lesins G., Dubey M. K. High values of the Arctic amplification in the early decades of the 21st century: Causes of discrepancy by CMIP6 models between observation and simulation Journal of geophysical research: Atmospheres. 2023. Vol. 128(23). e2023JD039269. <https://doi.org/10.1029/2023JD039269>
15. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундамент и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 11–26.
16. Previdi M., Smith K.L., Polvani L.M. Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms. Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16. 093003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>
17. Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера – арктические льды – океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 232–248.
18. Cohen J., Zhang X., Francis J. et al. Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. Nat. clim. chang. 2020. Vol. 10. P. 20–29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>
19. Xu M., Screen J.A., Tian W., Zhang J., Zhang C., Yu H. Influence of regional sea ice loss on the Arctic stratospheric polar vortex. Journal of geophysical research: Atmospheres. 2024. Vol. 129(15). e2023JD040571. <https://doi.org/10.1029/2023JD040571>
20. Budikova D. Role of Arctic sea ice in global atmospheric circulation: A review. Global and planetary change. 2009. Vol. 68(3). P. 149–163. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.04.001>

21. Taylor K.E., Stouffer R. J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. meteor. soc.* 2012. Vol. 93(4). P. 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
22. Barnes E.A., Polvani L.M. CMIP5 projections of Arctic amplification, of the North American/North Atlantic circulation, and of their relationship. *J. Climate.* 2015. Vol. 28(13). P. 5254–5271. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00589.1>
23. Davy R., Outten S. The Arctic surface climate in CMIP6: Status and developments since CMIP5. *J. Climate.* 2020. Vol. 33. P. 8047–8068. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0990.1>
24. England M.R., Eisenman I., Lutsko N.J., Wagner T.J.W. The recent emergence of Arctic amplification. *Geophysical research letters.* 2021. Vol. 48(15). e2021GL094086. <https://doi.org/10.1029/2021GL094086>
25. Hahn L.C., Armour K.C., Zelinka M.D., Bitz C.M., Donohoe A. Contributions to polar amplification in CMIP5 and CMIP6 models. *Frontiers in Earth science.* 2021. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.710036>.
26. Ye K., Messori G. Inter-model spread in the wintertime Arctic amplification in the CMIP6 models and the important role of internal climate variability // *Global and planetary change.* 2021. Vol. 204. 103543. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103543>
27. Chylek P., Folland C., Klett J. D., Wang M., Hengartner N., Lesins G., Dubey M.K. Annual mean Arctic Amplification 1970–2020: Observed and simulated by CMIP6 climate models. *Geophysical research letters.* 2022. Vol. 49(13). e2022GL099371. <https://doi.org/10.1029/2022GL099371>
28. Shu Q. et al. Arctic Ocean Amplification in a warming climate in CMIP6 models. *Sci. Adv.* 2022. Vol. 8(30). eabn9755. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn9755>
29. Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // *Известия ТИНРО.* 2018. Т. 193. С. 167–182. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-167-182>
30. Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Климатические изменения термических условий морских акваторий восточного сектора Арктики на рубеже XX-XXI веков // *Метеорология и гидрология.* 2019. № 7. С. 17–33.
31. Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий моря Лаптевых за последние 37 лет // *Вестник ДВО РАН.* 2019. № 1. С. 97–107. <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.203.1.011>
32. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Ред. В. М. Катцов. СПб.: Научное издание. 2022. 126 с.
33. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. № 146(730). P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
34. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // *Journal of climate.* 2017. Vol. 30. P. 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
35. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. meteor. soc.* 1996. Vol. 77(33). P. 437–471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
36. Reichler T., Kim J. How Well do coupled models simulate today's climate? *Bull Amer meteor soc.* 2008. Vol. 89(3). P. 303–312. <https://doi.org/10.1175/bams-89-3-303>
37. Lehner F., Deser C., Maher N., Marotzke J., Fischer E.M., Brunner L., Knutti R. Hawkins E. Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth syst. dynam.* 2020. Vol. 11(2). P. 491–508. <https://doi.org/10.5194/esd-11-491-2020>
38. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Global El Niño-Southern oscillation teleconnections in CMIP6 models. *Atmosphere.* 2024. Vol. 15. No. 4. 500. <https://doi.org/10.3390/atmos15040500>
39. Serykh I.V. El Niño-Southern oscillation prediction based on the global atmospheric oscillation in CMIP6 models. *Climate.* 2025. Vol. 13. № 2. 25. <https://doi.org/10.3390/cli13020025>
40. Schlesinger M.E. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature.* 1994. Vol. 367 (6465). P. 723–726. <https://doi.org/10.1038/367723a0>
41. Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // *Bull. Amer. meteor. soc.* 1997. Vol. 78(6). P. 1069–1080. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)

42. 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(5). P. 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
43. Покровский О.М., Покровский И.О. Когерентность колебаний компонентов глобальной климатической системы с медленными флуктуациями солнечной активности по данным наземных и спутниковых наблюдений // *Исследование Земли из космоса.* 2022. № 3. С. 3–16. <https://doi.org/10.1134/S0001433822090171>
44. 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. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-3-334-349>
45. Серых И.В., Трусенкова О.О. Изменение приповерхностной температуры Дальневосточного региона по данным реанализа ERA5 за 1940–2023 гг. и моделям CMIP6 до 2099 г. // *Тихоокеанская география.* 2025. № 1. С. 48–62. https://doi.org/10.35735/26870509_2025_21_4
46. Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Изменчивость и взаимосвязь основных климатических индексов для северной части Тихого океана: тренды, климатические сдвиги, спектры, корреляции // *Известия ТИНРО.* 2019. Т. 199, № 4. С. 163–178.
47. Вакуленко Н.В., Серых И.В., Сонечкин Д.М. Колебания десятилетнего масштаба средней температуры Северного полушария в рамках современного глобального потепления // *Океанология.* 2025. Т. 65. № 1. С. 5–22. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700644>
48. Серых И.В., Толстикова А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 2. Температура почвы, снег, влажность // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2022. Т. 68, № 4. С. 352–369. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369>
49. Hu J., Shen Y., Deng J., Jia Y., Wang Z., Li A. Revisiting the Influence of ENSO on the arctic stratosphere in CMIP5 and CMIP6 models // *Atmosphere.* 2023. Vol. 14(5):785. <https://doi.org/doi.org/10.3390/atmos14050785>

References:

1. Ivanov VV, Alekseev VA, Alekseeva TA, Koldunov NV, Repina IA, Smirnov AV. Is Arctic ice cover becoming seasonal? *Earth research from space.* 2013;4:50-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/s0205961413040076>
2. IPCC, 2021: Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Masson-Delmotte et al. (eds.) Cambridge Univ. Press. 2023.
3. O'Neill BC, Tebaldi C, van Vuuren DP, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific model development.* 2016;9:3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
4. Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill BC, Fujimori S, et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change.* 2017;42:153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
5. Isaksen K, Nordli Ø, Ivanov B, Køltzow MAØ, Aaboe S, Gjeltten HM, et al. Exceptional warming over the Barents area. *Scientific reports.* 2022;12(1):9371. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>
6. Serykh IV, Tolstikov AV. Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 1. Air temperature, precipitation, wind. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* 2022;68(3):258-277. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277>
7. Karandasheva TK, Ivanov BV, Demin VI, Revina AD, Ilyushchenkova IA, Antsiferova AR. Current trends in surface air temperature changes in the Barents and Kara Seas region. *Russian Arctic.* 2024;6(3):55-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-3-55-64>
8. Mokhov II. Contemporary climate changes in the Arctic. *Her. Russ. Acad. Sci.* 2015;85:265-271. <https://doi.org/10.1134/S1019331615030168>
9. Semenov VA. Modern Arctic climate research: progress, changing concepts, and current challenges. *Bulletin of the Russian Academy of sciences: Physics of the atmosphere and ocean.* (In Russ.). 2021;57(1):21-33. <https://doi.org/10.31857/S0002351521010119>

10. Rantanen M, Karpechko AY, Lipponen A, et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth environ.* 2022;3(1):168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
11. Bekryaev RV, Polyakov IV, Alexeev VA. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. *J. Climate.* 2010;23:3888-3906. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>
12. Serreze MC, Barry RG. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and planetary change.* 2011;77:85-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
13. Sarkisyan AS, Moshonkin SN, Diansky NA, Gusev AV, Bagno AV. Modeling feedbacks of climate-forming processes in the Arctic Ocean. *Arctic: Ecology and Economics.* 2013;1(9):12-23. (In Russ.).
14. Chylek P, Folland CK, Klett JD, Wang M, Lesins G, Dubey MK. High values of the Arctic Amplification in the early decades of the 21st century: Causes of discrepancy by CMIP6 models between observation and simulation. *Journal of geophysical research: Atmospheres.* 2023;128(23):e2023JD039269. <https://doi.org/10.1029/2023JD039269>
15. Alekseev GV. Manifestation and intensification of global warming in the Arctic. *Fundamental and Applied Climatology.* 2015;1:11-26. (In Russ.).
16. Previdi M, Smith KL, Polvani LM. Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms. *Environ. Res. Lett.* 2021;16:093003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>
17. Semenov VA. Fluctuations in the modern climate caused by feedbacks in the atmosphere-Arctic ice-ocean system. *Fundamental and applied climatology.* 2015;1:232-248. (In Russ.).
18. Cohen J, Zhang X, Francis J, et al. Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nat. clim. chang.* 2020;10:20-29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>
19. Xu M, Screen JA, Tian W, Zhang J, Zhang C, Yu H. Influence of regional sea ice loss on the Arctic stratospheric polar vortex. *Journal of geophysical research: Atmospheres.* 2024;129(15):e2023JD040571. <https://doi.org/10.1029/2023JD040571>
20. Budikova D. Role of Arctic sea ice in global atmospheric circulation: A review. *Global and planetary change.* 2009;68(3):149-163. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.04.001>
21. Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA. An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Amer. meteor. soc.* 2012;93(4):485-498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
22. Barnes EA, Polvani LM. CMIP5 Projections of Arctic amplification, of the North American/ North Atlantic circulation, and of their relationship. *J. Climate.* 2015;28(13):5254-5271. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00589.1>
23. Davy R, Outten S. The Arctic Surface Climate in CMIP6: Status and Developments since CMIP5. *J Climate.* 2020;33:8047-8068. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0990.1>
24. England MR, Eisenman I, Lutsko NJ, Wagner TJW. The recent emergence of Arctic amplification. *Geophysical research letters.* 2021;48(15):e2021GL094086. <https://doi.org/10.1029/2021GL094086>
25. Hahn LC, Armour KC, Zelinka MD, Bitz CM, Donohoe A. Contributions to polar amplification in CMIP5 and CMIP6 models. *Frontiers in Earth science.* 2021;9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.710036>
26. Ye K, Messori G. Inter-model spread in the wintertime Arctic amplification in the CMIP6 models and the important role of internal climate variability. *Global and planetary change.* 2021;204:103543. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103543>
27. Chylek P, Folland C, Klett JD, Wang M, Hengartner N, Lesins G, Dubey MK. Annual mean Arctic amplification 1970–2020: Observed and simulated by CMIP6 climate models. *Geophysical research letters.* 2022;49(13):e2022GL099371. <https://doi.org/10.1029/2022GL099371>
28. Shu Q, et al. Arctic Ocean amplification in a warming climate in CMIP6 models. *Sci. Adv.* 2022;8(30):eabn9755. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn9755>
29. Rostov ID, Dmitrieva EV, Vorontsov AA. Tendencies of climate changes for thermal conditions in the coastal waters of the western Bering Sea and adjacent areas in the last decades. *Izvestiya TINRO.* 2018;193:167-182. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-167-182>
30. Rostov ID, Dmitrieva EV, Vorontsov AA. Climatic changes in thermal conditions of marine waters of the eastern Arctic at the turn of the 20th-21st centuries. *Meteorology and hydrology.* 2019;7:17-33. (In Russ.).

31. Rostov ID, Dmitrieva EV, Vorontsov AA. Trends in climatic changes in thermal conditions of the Laptev sea over the past 37 years. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian academy of sciences*. 2019;1:97-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.203.1.011>
32. Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation. Ed. VM. Kattsov. St. Petersburg: Naukoemkie Technologies. 2022. 126 p. (In Russ.).
33. Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020;146(730):1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
34. Gelaro R, McCarty W, Suárez MJ, et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*. 2017;30;5419-5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
35. Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996;77(3):437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
36. Reichler T, Kim J. How well do coupled models simulate today's climate?. *Bull Amer meteor soc.* 2008;89(3):303-312. <https://doi.org/10.1175/bams-89-3-303>
37. Lehner F, Deser C, Maher N, Marotzke J, Fischer EM, Brunner L, Knutti R, Hawkins E. Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth syst. dynam.* 2020;11(2):491-508. <https://doi.org/10.5194/esd-11-491-2020>
38. Serykh IV, Sonechkin DM. Global El Niño-Southern oscillation eeleconnections in CMIP6 models. *Atmosphere*. 2024;15(4):500. <https://doi.org/10.3390/atmos15040500>
39. Serykh IV. El Niño-Southern oscillation prediction based on the global atmospheric oscillation in CMIP6 models. *Climate*. 2025;13(2):25. <https://doi.org/10.3390/cli13020025>
40. Schlesinger ME. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*. 1994;367(6465):723-726. <https://doi.org/10.1038/367723a0>
41. Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, Wallace JM, Francis RC. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. meteor. soc.* 1997;78(6):1069-1080. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)
42. Eyring V, Bony S, Meehl GA, et al. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. model dev.* 2016;9(5):1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
43. Pokrovsky OM, Pokrovsky IO. Coherence of fluctuations of components of the global climate system with slow fluctuations of solar aActivity according to Ground-Based and Satellite Observations. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2022;58(9):1131-1142. <https://doi.org/10.1134/S0001433822090171>
44. Serykh IV, Tolstikov AV. 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;14(3):334-349. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-3-334-349>
45. Serykh IV, Trusenkova OO. Change in surface air temperature in the Northeast Asia and Northwest Pacific from ERA5 reanalysis for 1940–2023 and CMIP6 models until 2099. *Pacific Geography*. 2025;1:48-62. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2025_21_4
46. Hen GV, Ustinova EI, Sorokin YuD. Variability and interrelationships of the main climate indices for the northern part of the Pacific Ocean: trends, climate shifts, spectra, correlations. *Izvestiya TINRO*. 2019;199(4):163-178. (In Russ.).
47. Vakulenko NV, Serykh IV, Sonechkin DM. Decadal oscillations of the mean temperature of the northern hemisphere during modern global warming. (In Russ.). *Oceanology*. 2025;65(1):1-17. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700644>
48. Serykh IV, Tolstikov AV. Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 2. Soil temperature, snow, humidity. *Arctic and Antarctic Research*. 2022;68(4):352-369. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369>
49. Hu J, Shen Y, Deng J, Jia Y, Wang Z, Li A. Revisiting the influence of ENSO on the arctic stratosphere in CMIP5 and CMIP6 Models. *Atmosphere*. 2023;14(5):785. <https://doi.org/10.3390/atmos14050785>