

Изменение приповерхностной температуры Дальневосточного региона по данным реанализа ERA5 за 1940–2023 гг. и моделям CMIP6 до 2099 г.

Илья Викторович СЕРЫХ¹,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
iserykh@ocean.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2435-7886>

Ольга Олеговна ТРУСЕНКОВА²
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
trolia@poi.dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6756-5354>

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

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

Аннотация. Выполнена оценка возможных изменений среднегодовой приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в Дальневосточном регионе, включающем территорию и окраинные моря России, а также северо-западную часть Тихого океана, до 2099 г., для чего используются осредненные по ансамблю данные 33 моделей проекта CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), полученные в рамках четырех сценариев, отвечающих разным уровням антропогенного радиационного форсинга (слабого, умеренного и значительного). Анализируются различия между осредненными за 30-летние периоды аномалиями ПТВ. Для верификации модельных результатов проанализировано потепление, произошедшее в регионе с 1940–1969 до 1994–2023 гг., для чего использованы данные реанализа ERA5 и эксперимента Historical CMIP6. По обоим видам данных средняя ПТВ в регионе выросла на 1.1 °C: с 1940–1969 к 1994–2023 гг.; это сходство обосновывает оценки будущих изменений ПТВ по моделям CMIP6. Все сценарии SSP (Shared Socio-economic Pathways) будущего радиационного форсинга показывают приблизительно одинаковое повышение ПТВ с 1994–2023 по 2024–2053 гг., оно составляет в среднем по региону 1.2–1.5 °C. К 2070–2099 гг. средняя ПТВ в рассматриваемом регионе возрастет соответственно темпу эмиссии парниковых газов – на 1.7, 2.7, 3.8 и 4.8 °C. Как показывают данные реанализа ERA5, от 1940–1969 к 1994–2023 гг. увеличение ПТВ над морскими акваториями региона происходило весьма неравномерно: наибольшие темпы наблюдались в северной части Охотского моря (до 2 °C и более) и в прибрежных районах северо-западной части Берингова моря (до 1.0–1.2 °C). Увеличение ПТВ ослабевало в направлении с северо-запада на юго-восток, т.е. с удалением от суши, и составило 0.2–0.6 °C в северо-западной части Тихого океана. Картина потепления над морскими акваториями по данным CMIP6 выражена сильнее, чем по данным реанализа ERA5, но при этом качественно им соответствует.

Ключевые слова: северо-западная часть Тихого океана, Японское море, Охотское море, Берингово море, изменение климата, модели CMIP6

Для цитирования: 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.

Change in surface air temperature in the Northeast Asia and Northwest Pacific from ERA5 reanalysis for 1940–2023 and CMIP6 models until 2099

Ilya V. SERYKH¹,

Candidate of Physico-mathematical Sciences, Senior research associate
iserykh@ocean.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2435-7886>

Olga O. TRUSENKOVA²

Candidate of Technical Sciences, Leading research associate
trolia@poi.dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6756-5354>

¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

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

Abstract. An assessment of possible changes in the annual mean surface air temperature (SAT) in the Far East Region (35°–65° N, 130°–180° E) is made from the present to 2099, using ensemble-averaged data from 33 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) models obtained within the framework of four scenarios corresponding to the weak, moderate, or significant anthropogenic radiative forcing resulting from CO₂ emissions. To elucidate long-term climate change, SAT averaged for 30-year periods, namely, 1994–2023, 2024–2053 and 2070–2099 are analyzed. To verify the model results, the warming that occurred in the region from the mid-20th century (1940–1969) to the early 21st century (1994–2023) is analyzed, using ERA5 data with the fine spatial resolution of 0.25°, and CMIP6 data with the coarser resolution, mostly 1.0°–2.0°. According to both data types, the regional SAT increased, on average by 1.1 °C from 1940–1969 to 1994–2023, justifying the use of forecast estimates based on the CMIP6 models in this work. All scenarios of possible radiative forcing show the similar SAT increase from the 1994–2023 to 2024–2053, on average 1.2–1.5 °C. On the contrary, by the 2070–2099, the regional SAT will increase in accordance with the emission rates on average by 1.7, 2.7, 3.8 and 4.8 °C, respectively. As for the Russian Far East land area, ERA5 and CMIP6 show similar spatial warming patterns, with the warming, on average, of 1.2 °C from 1940–1969 to 1994–2023, i.e. higher than that for the entire considered region including marine areas. From 1940–1969 to 1994–2023 negative annual mean SAT changed to positive one in some areas of the Primorsky, Khabarovsk and Kamchatksky provinces, implying the permafrost melting. According to the CMIP6 models, the land warming of 2.0–2.1 °C, 3.0–3.5 °C, 4.7–5.3 °C, and 6.1–6.6 °C is expected by the end of the 21st century for the scenarios with the different levels of radiative forcing. As shown by the ERA5 data, the SAT increase from 1940–1969 to 1994–2023 was very uneven for the marine areas: the highest rates were observed in the northern Okhotsk Sea (up to 2 °C and more) and in the coastal northwestern Bering Sea (up to 1.0–1.2 °C), which can be explained by the ice cover decrease. The SAT increase weakened in the direction from the northwest to southeast, i.e. with the distance from the land, and amounted to only 0.2–0.6 °C in the northwestern Pacific, which can be attributed to the effect of Pacific Decadal Oscillation (PDO). The coastal Okhotsk Sea off the Sakhalin Island is the only area where SAT decreased by 0.2–0.6 °C from 1940–1969 to 1994–2023, which probably can be attributed to the changes in the East Sakhalin Current transporting Amur River water southward along the coast but this suggestion should be verified. The warming pattern over the marine areas according to CMIP6 data qualitatively corresponds to that one based on ERA5 data, keeping in mind the lower resolution of the modeled data. The warming in the Northwest Pacific from the modeled data exceeds that one from ERA5, which can be explained by elimination of the PDO effects when averaging CMIP6 multi-model data.

Keywords: Northwest Pacific, Sea of Japan, Sea of Okhotsk, Bering Sea, climate change, CMIP6 models

For citation: Serykh I.V., Trusenkova O.O. 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.

Введение

Нынешние изменения климата, хотя и менее значительные, чем, например, ледниковые циклы, чрезвычайно важны из-за необходимости адаптации к ним. Для решения задачи прогноза климатических изменений как на ближайшие десятилетия, так и на срок до столетия и более в рамках Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) был собран ансамбль моделей земной системы (МЗС) [1]. МЗС включают как традиционные атмосферный и океанический блоки, так и блоки криосферы, верхнего слоя почвы и биоты, что делает их «цифровыми двойниками Земли». Благодаря этому МЗС позволяют делать физически обоснованные проекции изменений климата на десятилетия и даже столетия вперед, базирясь на различных возможных сценариях будущего социально-экономического развития человечества.

Помимо факторов естественного изменения климата, таких как изменения солнечной радиации и извержения вулканов, при прогностическом климатическом моделировании вводится антропогенный радиационный форсинг, причем в различных вариантах: слабых, умеренных или значительных выбросов парниковых газов, описывающих вероятные сценарии будущих изменений климата (Shared Socio-economic Pathways – SSPs) [2]. По изменению концентрации парниковых газов в атмосфере, поглощающих длинноволновое излучение Земли, рассчитывается дополнительный радиационный форсинг, учитываемый при моделировании (табл. 1).

Для объединения усилий разрабатывающих МЗС научных организаций под эгидой Всемирной программы исследований климата (World Climate Research Programme – WCRP) запущен проект сравнения МЗС (Coupled Model Intercomparison Project – CMIP) [3]. В настоящее время выполняется уже шестой этап этого проекта (CMIP6), в рамках которого научным сообществом предлагаются, обсуждаются и отбираются наиболее важные эксперименты, которые выполняются с МЗС участвующими в CMIP, а их результаты объединяются в однородный ансамбль для дальнейшего анализа. При достаточно большом объеме этой выборки (более 30 МЗС) такой подход позволяет подавить ошибки, неизбежно накапливающиеся в экспериментах с каждой МЗС в отдельности из-за их сложности и несовершенства аппроксимаций подсеточных процессов. Полученный опыт анализа ансамблевых результатов моделирования позволил сделать вывод об отсутствии лучшей МЗС, что объясняется разнообразием в равной степени правдоподобных подходов и аппроксимаций. При этом мультимодельный ансамблевый подход к оценке будущих изменений климата представляется наиболее надежным и обоснованным [3].

Модели CMIP6 имеют относительно невысокое пространственное разрешение (1.0–2.0°, в отдельных случаях 0.5–0.7°), что обусловлено ограниченностью вычислительных ресурсов, и это осложняет оценки региональных климатических изменений, которые могут значительно отличаться от глобальных. Региональное климатическое моделирование подразумевает использование (для отдельных областей) модели с повышенным пространственным разрешением, которая вложена в глобальную МЗС, предоставляющую для нее граничные условия. Такое моделирование уже выполнялось для разных районов северной части Тихого океана и окраинных морей юго-восточной Азии [4], но не для дальневосточной территории России. Вместе с тем размеры исследуемого региона позволяют надеяться на получение адекватных оценок климатических изменений даже по МЗС CMIP6. В «Третьем оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации» [5] обсуждались возможные будущие климатические изменения,

в первую очередь потепление, но Дальневосточный регион, включающий территорию и окраинные моря России, а также северо-западную часть Тихого океана, отдельно не рассматривался, что и делает актуальной решаемую в настоящей статье задачу.

Для понимания значимости возможных будущих климатических изменений их необходимо сравнить с изменениями, произошедшими за последние десятилетия. Подобные оценки уже делались для прибрежной зоны и окраинных морей России [6–8]. В частности, показано, что со второй половины 1960-х до середины 2000-х гг. температура приземного слоя воздуха над дальневосточными морями России в целом характеризуется тенденцией к увеличению со среднегодовыми значениями от 0.1 °C/10 лет в 1980-е гг. до 0.3 °C/10 лет к концу этого периода [6]. В период 1950–2020 гг. температура поверхности дальневосточных морей повышалась во все сезоны года, причем в Беринговом и Охотском морях скорость этого повышения была значительнее, чем в Японском, составляя 0.17 °C/10 лет и 0.10–0.13 °C/10 лет соответственно [6]. В северо-западной части Тихого океана линейные тренды температуры поверхности (ТПО) за период 1950–2019 гг. практически отсутствуют [7], однако в последние десятилетия (1978–2018 гг.) тренды составили в среднем 0.19 °C/10 лет и до 0.3 °C/10 лет в отдельных зонах [8].

Термические условия рассматриваемого региона связаны с естественной изменчивостью в системе океан – атмосфера, в первую очередь с такими климатическими модами, как Северотихоокеанское декадное колебание (Pacific Decadal Oscillation – PDO) [9] и Эль-Ниньо – Южное колебание (El Niño–Southern Oscillation – ENSO) [10], что влияет на величины трендов, весьма чувствительных к начальным и конечным условиям периодов оценки. Еще одним важным фактором являются сдвиги климатического режима, приводящие к резким изменениям термических и других характеристик и также влияющие на оценки трендов [11].

В связи с изложенным, целью настоящей работы является оценка возможных изменений приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в регионе до 2099 г. по результатам климатического моделирования (в рамках проекта СМIP6) и сопоставление с надежными данными современного реанализа ERA5 в период 1940–2023 гг. Чтобы нивелировать эффект межгодовой климатической изменчивости, влияющий на оценки трендов, а также выполнить рекомендацию Всемирной метеорологической организации (ВМО) о принятии в качестве климатических норм средних значений за 30 лет, выполнено сравнение температур, осредненных за 30-летние временные промежутки. Этот прием позволяет выявить долговременные изменения, не прибегая к оценке трендов. Следует отметить, что исследование по данной методике было уже выполнено для западной части российской Арктики [12].

Материалы и методы

Для оценки возможных изменений климата рассматриваемого региона, ограниченного координатами (35–65° с. ш., 130–180° в. д.), до конца XXI в. использована ПТВ, полученная по результатам экспериментов SSP с 33 МЗС проекта СМIP6 за период 2015–2099 гг. [13]. Выбранный регион удобен для обработки данных и позволяет ограничить область суши в основном территорией России. Зона к северу от 65° с. ш. относится к восточной Арктике и планируется для отдельного рассмотрения в будущем. В качестве исследуемых вероятных социально-экономических сценариев (SSP) выбраны SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 [1], поскольку их результаты предоставило наибольшее число МЗС проекта СМIP6 (см. названия моделей в табл. 2). Эти сценарии различаются антропогенным радиационным форсингом, ориентировочные значения которого на конец XXI в. отображены в их названиях (табл. 1). Для сравнения привлекаются результаты эксперимента Historical, выполненного до 2014 г. включительно, в котором присутствует радиационный форсинг от исторических выбросов парниковых газов, антропогенных

аэрозолей, солнечной активности и крупных извержений вулканов (табл. 1). Поскольку эксперимент Historical ограничен 2014 г., он дополнен соответствующими результатами экспериментов SSP за период 2015–2099 гг., что дало для каждой из 33 МЗС 4 набора непрерывных данных за 1940–2099 гг. Отметим, что результаты для сценария SSP2-4.5 отражают продолжение текущих тенденций.

Таблица 1

Эксперименты с различными сценариями радиационного форсинга

Table 1. Experiments for different radiation forcing scenarios

Сценарий	Период, гг.	Форсинг, Вт/м ²	Краткое описание (по терминологии [1])
Historical	1850–2014	~2.1	Воспроизведение произошедших изменений климата, зафиксированных по инструментальным наблюдениям
SSP1-2.6	2015–2100	2.6	Устойчивость – «зеленый путь» (значительные возможности смягчения последствий и адаптации)
SSP2-4.5	2015–2100	4.5	Продолжение текущих тенденций – «умеренный путь» (умеренные возможности смягчения последствий и адаптации)
SSP3-7.0	2015–2100	7.0	Региональное соперничество – «каменистый путь» (незначительные возможности смягчения последствий и адаптации вследствие несогласованной политики разных стран)
SSP5-8.5	2015–2100	8.5	Продолжение социально-экономического развития на основе использования ископаемого топлива – «скоростное шоссе» (значительные сложности смягчения последствий и адаптации)

Для контроля выполнена оценка изменения ПТВ за период надежных инструментальных измерений по данным европейского реанализа ERA5 с пространственным разрешением 0.25° за 1940–2023 гг. [14], что наиболее подходит для целей работы. Также привлекались спутниковые данные NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) о ТПО северо-западной части Тихого океана, архив OISST v2 с разрешением 0.25° за 1982–2023 гг. [15].

Рассчитывались аномалии, полученные вычитанием из среднемесячных значений ПТВ среднего годового хода (нормы) в каждом узле сетки. В качестве единой для всех используемых данных нормы принят самый ранний 30-летний период, покрываемый данными OISSTv2, а именно, 1982–2011 гг. По нормативам ВМО за оперативную климатическую норму был принят период 1981–2010 гг. [16], а норма, используемая в настоящей работе, почти от нее не отличается, но более удобна с точки зрения обеспеченности данными спутниковых наблюдений. Рассчитывались среднегодовые аномалии ПТВ и ТПО, которые и рассматриваются далее. Как обсуждалось выше, оценки линейных трендов весьма чувствительны к начальным и конечным значениям временных рядов, поэтому наш анализ долгосрочных изменений климата основан на сравнении аномалий, осредненных за 30-летние периоды 1940–1969 и 1994–2023 гг., как по данным реанализа ERA5, так и по комбинации модельных результатов Historical и SSP (см. выше), а также за периоды 2024–2053 и 2070–2099 гг. по результатам МЗС в рамках сценариев SSP, сведенных в табл. 1. Модельные результаты усреднялись по всему ансамблю из 33 МЗС. Отметим, что при использовании единой нормы для всего срока разность аномалий между периодами равна разности температур. Выбранные для осреднения исторические периоды (1940–1969 и 1994–2023 гг.) не включают в себя наиболее значительные климатические сдвиги, которые произошли в рассматриваемом регионе во второй половине 1970-х и конце 1980-х гг. [11], и поэтому данные ПТВ внутри выбранных 30-летних периодов являются более стационарными, чем в другие возможные периоды, включающие в себя указанные климатические сдвиги.

В данной работе используются гидродинамические (не статистические) МЗС CMIP6, состоящие из различных блоков климатической системы. Благодаря этому существует возможность продолжить вычисления для оценки будущего состояния климата (сделать

так называемые климатические проекции) на основе задания различного внешнего воздействия (радиационного форсинга), определяемого выбранными сценариями SSP будущих изменений концентрации парниковых газов в атмосфере. Проекция – это описание того, что может произойти в будущем при различных сценариях развития человечества; она допускает значительные изменения в наборе граничных условий, которые могут на нее повлиять.

Ансамбль из рассматриваемых 33 МЗС СМIP6 позволяет оценить погрешность климатических проекций для каждого из сценариев SSP. В первые десятилетия в неопределенность климатической проекции наибольший вклад вносит естественная (внутренняя) климатическая изменчивость, в середине XXI в. наибольшую неопределенность вносит межмодельный разброс, а к концу XXI в. на ошибки сильнее всего влияют различия сценариев SSP [17, 18]. Необходимо иметь в виду, что в различных МЗС СМIP6 применяются различные методы для представления одних и тех же физических, химических и биологических процессов; способы задания глубины пограничного слоя; различаются пространственное разрешение и параметризация процессов с пространственными масштабами меньше ячейки сетки (т.н. подсеточных процессов) и др. Все это вносит существенные различия в результаты анализируемых 33 МЗС СМIP6. С большой долей вероятности можно предположить, что каждая из МЗС СМIP6 содержит собственные случайные ошибки, которые подавляются при усреднении по достаточно большому ансамблю, что обычно и делается при анализе результатов МЗС СМIP6 [1].

Результаты и обсуждение

За период 1940–2023 гг. термические условия в рассматриваемом регионе изменялись весьма значительно, как видно из графика средней по региону ПТВ (рис. 1). С начала 1940-х до середины 1980-х гг. происходило незначительное похолодание, а затем быстрое потепление, которое с непродолжительными перерывами продолжается и до настоящего времени (рис. 1, черная линия), чему соответствуют изменения ТПО северо-западной части Тихого океана (рис. 1, голубая линия); средняя ПТВ по ансамблю МЗС из эксперимента Historical демонстрирует подобные же тенденции (рис. 1, красная линия). Между 1940–1969 гг. и 1994–2023 гг. среднее увеличение ПТВ в рассматриваемом регионе составило 1.1 °C по результатам ансамбля 33 МЗС СМIP6 при стандартном отклонении 0.4 °C (табл. 2), что соответствует данным ERA5.

По данным ERA5 ПТВ демонстрирует значительную межгодовую и междесятилетнюю изменчивость (рис. 1), связанную с климатическими модами, такими как ENSO и PDO, и сдвигами климатического режима рассматриваемого региона. Напротив, при усреднении по ансамблю МЗС эта естественная климатическая изменчивость оказывается подавлена, о чем свидетельствует значительное среднеквадратичное отклонение величины аномалий по ансамблю МЗС (в среднем 0.4 °C). Тем не менее в средних ПТВ по данным ERA5 и эксперимента Historical, а также в ТПО по данным OISSTv2 воспроизводятся сдвиг климатического режима в 1989 г. и похолодание в 1992–1993 гг., связанное с произошедшим в 1991 г. извержением вулкана Пинатубо, после которого произошел обильный выброс аэрозолей в атмосферу и уменьшение потока достигающей поверхности солнечной радиации. Средняя ПТВ по эксперименту Historical воспроизводит похолодание после извержения вулкана Агунг в 1963 г., тогда как по данным ERA5 оно замаскировано интенсивной межгодовой изменчивостью, связанной с ENSO. Напротив, сдвиг климатического режима 1976–1977 гг., связанный с переходом PDO из отрицательной фазы в положительную, воспроизводится по данным реанализа ERA5, но не по МЗС.

В целом временные ряды средней ПТВ по данным ERA5 и экспериментов Historical – SSP за период 1940–2023 гг. удовлетворительно согласуются друг с другом, что позволяет рассматривать проекции по МЗС. Все сценарии SSP возможных будущих изменений ПТВ

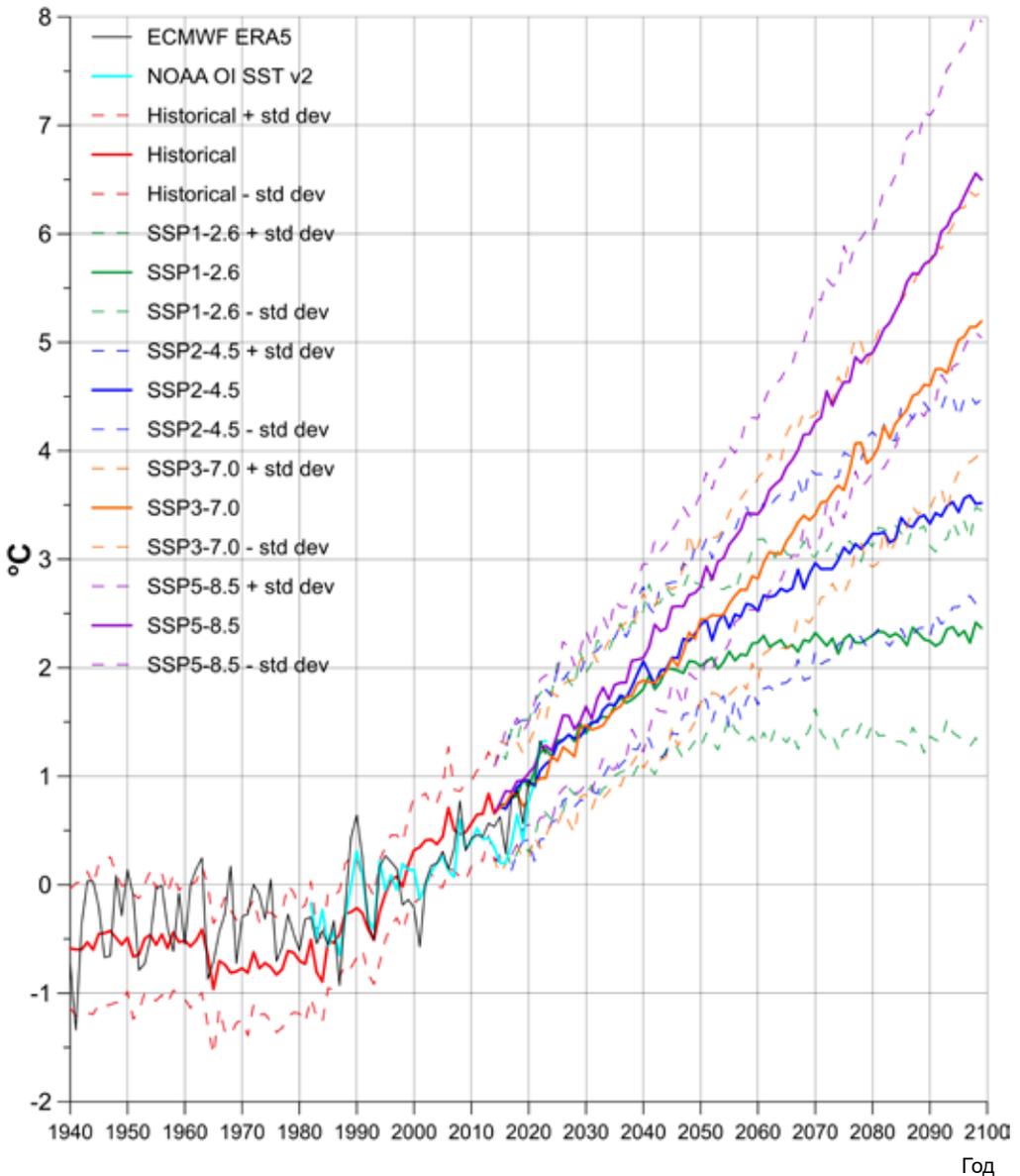


Рис. 1. Осредненные по рассматриваемому региону среднегодовые аномалии приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) по данным ERA5 за 1940–2023 гг. (черная линия) и средние по мультимодельному ансамблю CMIP6 для разных сценариев: Historical за 1940–2014 гг. (красная линия), SSP1-2.6 (зеленая линия), SSP2-4.5 (синяя линия), SSP3-7.0 (оранжевая линия) и SSP5-8.5 (фиолетовая линия) за 2015–2099 гг. (стандартные отклонения по ансамблю моделей – пунктирные линии). Среднегодовые аномалии температуры поверхности северо-западной части Тихого океана по данным OISSTv2 за 1982–2023 гг. (голубая линия). Все аномалии вычислялись относительно среднего за 1982–2011 гг.

Fig. 1. Averaged annual mean surface air temperature (SAT) anomalies from ERA5 for 1940–2023 (black line) and CMIP6 multi-model mean SAT for the Historical (red line) for 1940–2014, SSP1-2.6 (green line), SSP2-4.5 (blue line), SSP3-7.0 (orange line), and SSP5-8.5 (purple line) for 2015–2099 (standard deviations for the model ensembles are shown by dashed lines) scenarios in the region under consideration. Annual mean sea surface temperature anomalies averaged in the Northwest Pacific based on OISST data for 1982–2023 (light blue line). Anomalies were calculated using mean values for 1982–2011

Таблица 2

Разности средней ПТВ в рассматриваемом регионе для анализируемых моделей и сценариев CMIP6 между 1994–2023 и 1940–1969 гг. ($\Delta T1$), между 2024–2053 и 1994–2023 гг. ($\Delta T2$), между 2070–2099 и 1994–2023 гг. ($\Delta T3$)

Table 2. Change of mean surface air temperature of the analyzed CMIP6 models and scenarios in the region under consideration between 1994–2023 and 1940–1969 ($\Delta T1$), 2024–2053 and 1994–2023 ($\Delta T2$), and 2070–2099 and 1994–2023 ($\Delta T3$) for the analyzed CMIP6 models and scenarios

M3C	$\Delta T1$ (°C)	$\Delta T2$ (°C)				$\Delta T3$ (°C)			
	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	1.09	1.94	1.68	1.54	2.18	3.20	4.10	4.81	6.20
AWI-CM-1-1-MR	1.26	0.70	1.12	1.26	1.24	1.05	2.23	3.38	3.99
BCC-CSM2-MR	0.59	0.95	1.32	1.15	1.21	1.19	2.47	4.02	4.03
CAMS-CSM1-0	0.56	0.50	0.68	0.72	0.94	0.84	1.69	2.32	2.82
CAS-ESM2-0	0.98	1.46	1.18	1.22	1.48	2.53	3.53	3.63	4.89
CAS FGOALS-f3-L	0.98	0.77	1.16	1.19	1.11	1.06	2.22	3.39	4.12
CAS FGOALS-g3	0.96	0.38	0.89	1.03	0.84	0.66	1.80	2.92	3.17
CCCma CanESM5	1.48	1.69	1.68	2.01	2.32	2.39	3.90	5.89	6.98
CCCma CanESM5-CanOE	1.68	1.64	1.97	2.40	2.46	2.44	3.67	6.05	7.25
CMCC-CM2-SR5	1.55	1.13	1.14	1.22	1.62	3.11	3.84	4.29	5.72
CMCC-ESM2	1.41	1.12	1.19	1.00	1.21	3.59	4.00	4.00	5.66
CNRM-CM6-1	1.65	0.82	0.89	0.73	0.92	1.13	2.16	3.50	4.74
CNRM-CM6-1-HR	1.13	1.20	1.04	1.06	1.40	1.64	2.58	3.45	4.46
CNRM-ESM2-1	1.23	0.67	0.85	0.89	1.38	1.12	2.40	3.22	4.28
CSIRO ACCESS-CM2	0.89	1.83	1.78	1.60	1.92	2.59	3.46	4.56	5.51
CSIRO ACCESS-ESM1-5	1.14	1.52	1.73	1.16	1.94	2.22	3.26	4.16	5.11
EC-Earth3	2.09	1.58	1.66	1.69	1.96	1.73	2.97	4.63	5.82
EC-Earth3-Veg	1.65	1.13	1.19	1.10	1.78	1.85	2.95	4.32	5.49
INM-CM4-8	0.54	0.89	1.31	1.29	1.49	1.31	1.91	3.39	4.07
INM-CM5-0	0.75	0.92	1.05	1.14	1.30	0.97	1.96	2.92	3.57
IPSL-CM6A-LR	1.10	1.08	1.30	1.44	1.51	1.83	3.25	4.37	5.96
MIROC-ES2L	0.77	1.26	1.41	1.34	1.57	1.64	2.63	3.59	4.50
MIROC6	0.59	1.10	1.12	1.17	1.34	1.42	2.30	3.17	4.28
MOHC UKESM1-0-LL	1.39	2.03	2.15	2.65	2.66	3.12	4.36	6.02	7.27
MPI-ESM1-2-LR	0.96	0.65	0.98	0.77	0.49	0.79	1.81	3.19	3.85
MRI-ESM2-0	0.59	1.41	1.49	1.39	1.80	1.17	2.52	3.32	4.04
NASA GISS-E2-1-G	1.17	1.29	1.25	0.84	1.19	1.97	2.22	2.66	3.72
NCAR CESM2	1.29	1.36	1.05	0.84	1.51	1.28	2.13	3.15	4.79
NCAR CESM2-WACCM	1.32	1.06	1.01	1.08	1.55	1.37	2.13	3.36	5.05
NCC NorESM2-LM	0.98	1.05	1.06	1.16	1.46	1.31	2.30	3.39	4.67
NCC NorESM2-MM	0.93	0.77	1.32	0.98	1.47	1.29	2.30	3.35	4.34
NIMS-KMA KACE-1-0-G	1.53	2.12	2.31	2.23	2.27	2.44	3.14	4.24	5.39
NOAA GFDL-ESM4	0.24	0.86	0.88	0.82	0.95	1.22	2.00	2.84	3.14
Минимум	0.24	0.38	0.68	0.72	0.49	0.66	1.69	2.32	2.82
Максимум	2.09	2.12	2.31	2.65	2.66	3.59	4.36	6.05	7.27
Стандартное отклонение	0.41	0.44	0.39	0.47	0.49	0.78	0.77	0.92	1.13
Среднее	1.11	1.18	1.30	1.28	1.53	1.74	2.73	3.80	4.81

демонстрируют потепление, причем не только в среднем по ансамблю, но и для каждой МЗС в отдельности, при этом, как и ожидалось, ПТВ растет быстрее при более высоких выбросах CO_2 (рис. 1, табл. 2). Тем не менее приблизительно до 2040 г. все сценарии SSP показывают приблизительно одинаковое увеличение средней ПТВ, с разницей между 2024–2053 гг. и 1994–2023 гг. в 1.2–1.5 °C (табл. 2). Сценарий SSP1-2.6 подразумевает не медленное существенное сокращение антропогенных выбросов CO_2 и их полное обнуление к 2075 г., поэтому ПТВ стабилизируется во второй половине XXI в. как в глобальном масштабе [1], так и в рассматриваемом регионе (рис. 1). В сценарии SSP2-4.5 выбросы постепенно сокращаются на протяжении XXI в., в сценарии SSP3-7.0 выбросы растут и к концу века удваиваются, в сценарии SSP5-8.5 – утраиваются. При этом увеличение средней по региону ПТВ составит 1.7, 2.7, 3.8 и 4.8 °C соответственно; сходные результаты дают и индивидуальные МЗС (табл. 2). Следует отметить, что отдельные МЗС далеко не всегда корректно воссоздают естественные моды колебаний климата (их периоды и фазы могут различаться), что выражается в слабых межгодовых колебаниях средней по мульти-модельному ансамблю температуры (рис. 1).

В пространственном распределении среднегодовой ПТВ по данным ERA5 за 1940–1969 гг. (рис. 2А) и 1994–2023 гг. (рис. 2Б) ярко проявляется термический контраст между сушей и морской поверхностью: среднегодовая ПТВ находится в диапазонах приблизительно от –16 до 0 °C над сушей и от 0 до 18 °C над морем, что и определяет муссонный характер климата рассматриваемого региона. Низкая среднегодовая ПТВ (около 0 °C и ниже) характерна для прилегающих к суше частей Охотского и Берингова морей, покрытых льдом в холодное время года. Общая пространственная картина не изменяется от раннего периода к позднему (рис. 2А, Б), однако за это время произошли заметные количественные изменения: ПТВ выросла почти во всем регионе (рис. 2В). На территории России ПТВ увеличилась на 1.0–1.4 °C (в среднем на 1.2 °C), причем в некоторых районах Приморского, Хабаровского и Камчатского краев отрицательные среднегодовые температуры сменились положительными. Значительное повышение ПТВ (на 1.6–1.8 °C) произошло в крайнем северо-восточном районе, примыкающем к арктической зоне.

ПТВ на морских акваториях в среднем выросла на 0.4 °C. Наибольшее по региону увеличение ПТВ (1.6–2.4 °C) произошло в северной части Охотского моря, причем отрицательная среднегодовая ПТВ в период 1940–1969 гг. сменилась положительной в период 1994–2023 гг. (рис. 2А–В). Потеплению в районе Охотского моря соответствует хорошо известное снижение ледовитости, по крайней мере, с середины XX в. [6, 19]. Более позднее образование морского льда осенью и более раннее его разрушение весной, а также расширение полыней в ледовый период приводят к повышению поглощения солнечной радиации верхним слоем моря и увеличению потока тепла в атмосферу, с чем и можно связать увеличение ПТВ в северной части Охотского моря. Этими же причинами можно объяснить значительное увеличение ПТВ (более 1 °C) в прибрежных районах северо-западной части Берингова моря, покрытых льдом в холодный период года. В Охотском море восточнее о-ва Сахалин ПТВ снизилась на 0.2–0.6 °C, что, возможно, связано с изменениями Восточно-Сахалинского течения, переносящего амурские воды с севера на юг вдоль берега. Проверка этого предположения требует специального исследования. Разница ПТВ между двумя периодами уменьшалась в направлении с северо-запада на юго-восток, т.е. с удалением от суши: в Беринговом море ПТВ повысилась на 0.6–1.0 °C, в Японском – на 0.6–0.8 °C, в северо-западной части Тихого океана увеличение ПТВ составило только 0.2–0.6 °C (рис. 2В). Вместе с тем средняя ТПО исследуемого региона увеличилась за последние 40 лет на ~0.8 °C [8], чему соответствует и увеличение ПТВ, однако значительная доля повышения ПТВ приходится на период 1994–2023 гг. (см. рис. 1), т.е. внутри периода осреднения. Таким образом, от 1940–1969 к 1994–2023 гг. термический контраст между океаном и сушей сократился на ~0.8 °C, что соответствует имеющимся представлениям об ослаблении восточноазиатского муссона [6].

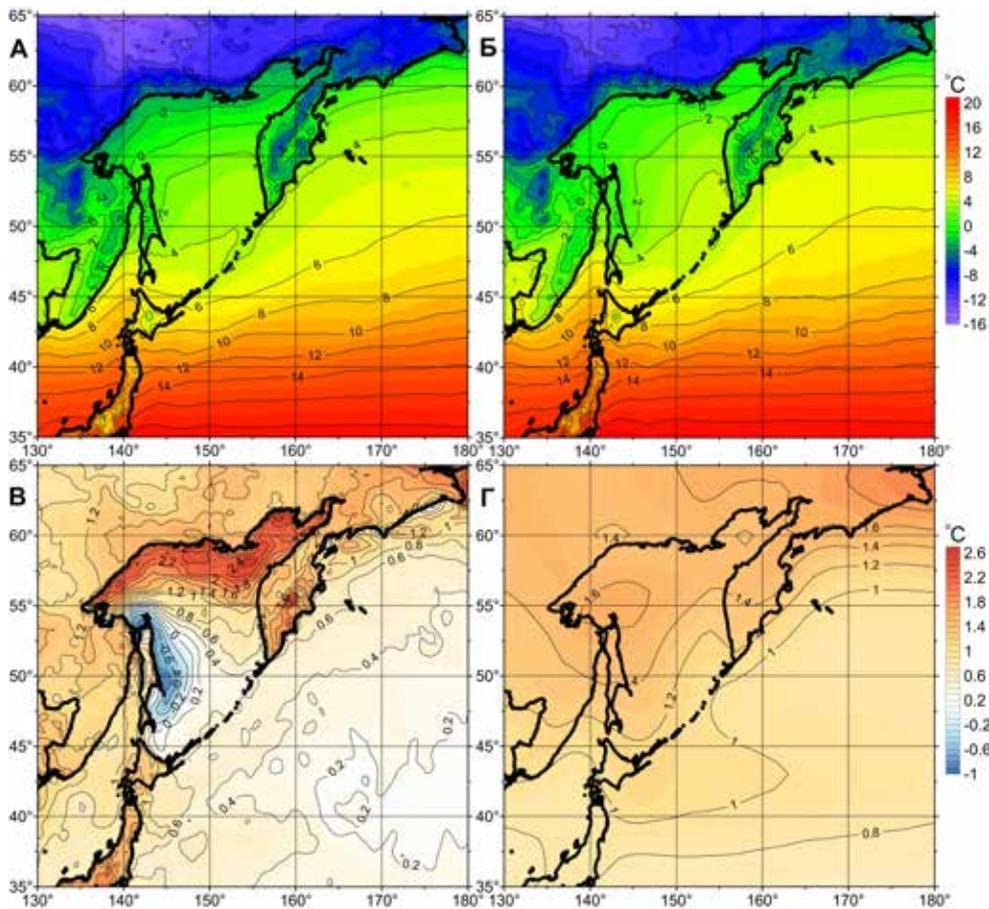


Рис. 2. Средняя ПТВ по данным ERA5 за 1940–1969 гг. (А) и за 1994–2023 гг. (Б); разность ПТВ между (Б) и (А) по данным ERA5 (В); разность ПТВ между (Б) и (А) по ансамблю МЗС результатов эксперимента Historical за 1940–2014 гг., дополненному результатами эксперимента SSP2-4.5 за 2015–2023 гг. (Г)

Fig. 2. Annual mean SAT anomalies from ERA5 for 1940–1969 (A) and 1994–2023 (B), SAT change between (B) and (A) from ERA5 (B), and the same as in (B) but from the CMIP6 multi-model ensemble for the Historical experiment (1940–2014) supplemented by the results of the SSP2-4.5 experiment (2015–2023) (Г)

Для сравнения на рис. 2Г приведено поле, аналогичное показанному на рис. 2В, но основанное на результатах экспериментов Historical – SSP2-4.5. Пространственная картина, основанная на этих результатах, качественно соответствует полученной по данным реанализа ERA5, за исключением мелкомасштабных деталей, не воспроизводимых из-за недостаточного пространственного разрешения МЗС, что особенно заметно на п-ве Камчатка, в Охотском море и прибрежных районах западной части Берингова моря. МЗС воспроизводят большее увеличение ПТВ на суше в сравнении с морскими акваториями, и среднее количественное увеличение ПТВ над сушей близко к оценке по данным ERA5 (1.6–1.8 °C в сравнении с 1.0–1.4 °C). Напротив, оценка потепления над морской поверхностью с помощью МЗС оказалась завышенной: для северо-западной части Тихого океана она составила 0.8–1.0 °C, т.е. вдвое больше, чем по данным реанализа ERA5 (в среднем 0.4 °C). Это приведет к ошибке в оценке теплового контраста между сушей и океаном и изменений восточноазиатского муссона. Неясна также причина возникновения теплого «пятна» в северо-западной части Охотского моря (к северу от о-ва Сахалин), где, возможно, концентрируются амурские воды. За исключением этого, МЗС верно воспроизводят потепление в регионе.

На рис. 3 показаны поля, аналогичные изображенным на рис. 2В, Г, но представляющие проекции изменений климата в регионе до 2070–2099 гг., т.е. разности ПТВ между этим периодом и 1994–2023 гг., осредненные по мультимодельному ансамблю для четырех рассматриваемых сценариев (табл. 1). Напомним, что ПТВ за 1994–2023 гг. оценивалась по результатам эксперимента Historical за 1994–2014 гг. и дополнялась результатами четырех рассматриваемых сценариев SSP за 2015–2023 гг. Имеет место качественное соответствие этих полей с аналогичным полем изменений ПТВ, но между предыдущими периодами (см. рис. 2Г и рис. 3).

Как и ожидалось, проекции на рис. 3 показывают значительное потепление от 1994–2023 к 2070–2099 гг., причем на суше ожидается увеличение ПТВ на 2.0–2.1 °C, 3.0–3.5 °C, 4.7–5.3 °C и 6.1–6.6 °C для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 соответственно. Наиболее значительное потепление на суше ожидается в крайнем северо-восточном районе, примыкающем к восточной Арктике, что наблюдалось и в полях по данным реанализа за период инструментальных наблюдений (рис. 2В). Потепление в Арктике происходит значительно интенсивнее, чем в средних широтах [20], что подтверждается

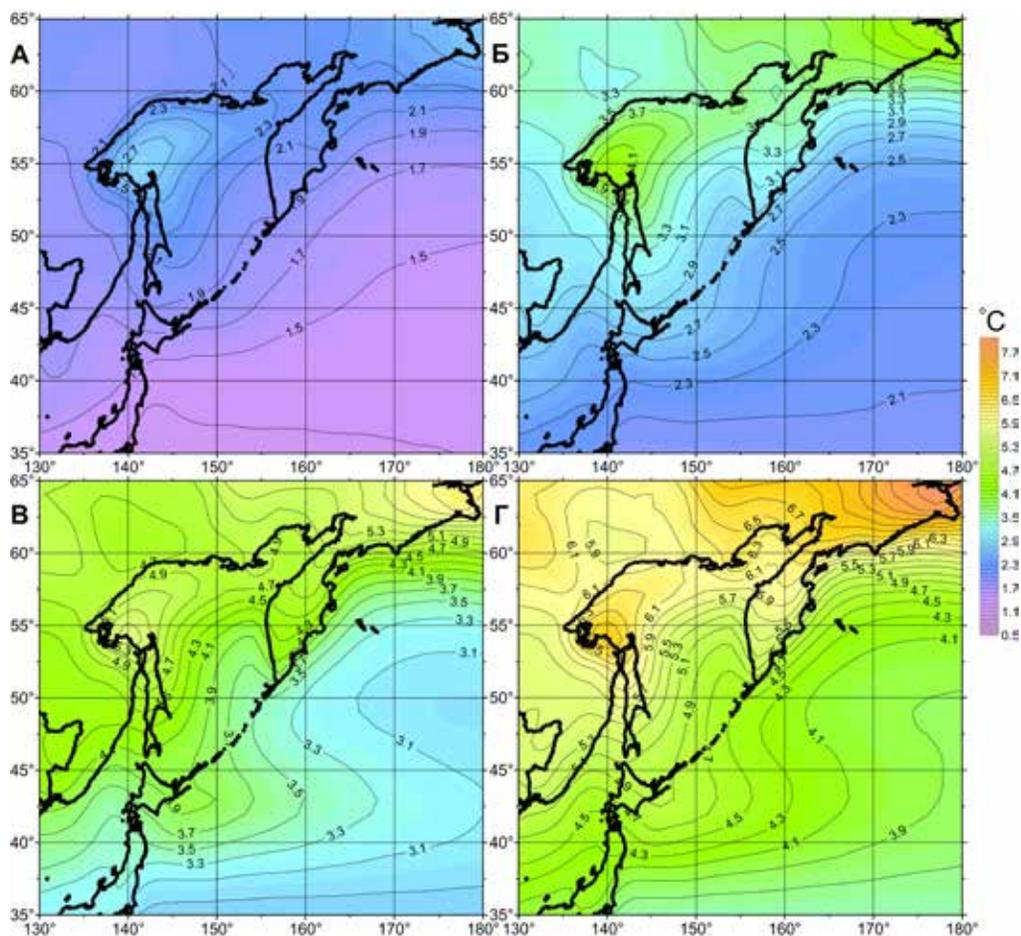


Рис. 3. Разность ПТВ, осредненной по ансамблю МЗС, между периодами 2070–2099 гг. и 1994–2023 гг. согласно сценариям SSP1-2.6 (А), SSP2-4.5 (Б), SSP3-7.0 (В) и SSP5-8.5 (Г). Данные за 1994–2014 гг. взяты из эксперимента Historical

Fig. 3. Annual mean SAT change between 2070–2099 and 1994–2023 from the CMIP6 multi-model ensemble for the SSP1-2.6 (A), SSP2-4.5 (B), SSP3-7.0 (B) and SSP5-8.5 (Г) scenarios. Data for 1994–2014 are taken from the Historical experiment

и нашими результатами. Оценки потепления над северо-западной частью Тихого океана имеют существенно меньшие величины по сравнению с сушей.

Поскольку МЗС вполне удовлетворительно воспроизводят потепление на суше, произошедшее с середины XX до первой четверти XXI в., полученные оценки увеличения ПТВ над сушей к 2070–2099 гг. можно считать достаточно реалистичными. Напротив, оценки потепления над северо-западной частью Тихого океана приходится считать менее достоверными из-за значительного их расхождения по данным ERA5 и CMIP6, которое можно объяснить влиянием PDO (см. рис. 2В, Г).

Различные МЗС по-разному воспроизводят периодичность и фазы естественной климатической изменчивости, к которой относится и PDO, из-за чего, как упоминалось выше, при осреднении по ансамблю эта изменчивость подавляется. В данных же ERA5 сигнал PDO присутствует, а максимальные аномалии, связанные с PDO, развиваются в широтной зоне 35–45° с.ш. в западной и центральной частях Тихого океана, куда входит и юго-восточная часть исследуемого региона. Большая часть периода 1940–1969 гг. относится к отрицательной фазе PDO, начавшейся в 1946 г., когда в этом районе имели место положительные аномалии ТПО [9], причем эта фаза была весьма мощной: индекс PDO зачастую опускался ниже –2, а временами достигал и –3, тогда как в период 1994–2023 гг. отрицательная и положительная фазы PDO несколько раз сменяли друг друга и были довольно слабыми, индекс почти не достигал –2 [21], т.е. отепляющий вклад PDO был выше в 1940–1969 гг., чем в 1994–2023 гг. При обсуждении PDO обычно рассматриваются аномалии ТПО, однако, как показало выполненное нами сравнение данных Met Office Hadley Centre HadISST [22] и ERA5, среднегодовые аномалии ТПО и ПТВ весьма близки и различаются в среднем лишь на 0.2–0.3 °С, что и объясняет результаты, полученные по данным ERA5.

Исходя из полученных результатов можно полагать, что в течение XXI в. повышение ПТВ над северо-западной частью Тихого океана будет меньше, чем над сушей рассматриваемого региона, из-за стабилизирующей роли океана (рис. 3), это уменьшит термический контраст между сушей и океаном и, как следствие, ослабит восточноазиатский муссон. Однако при этом следует принимать во внимание существенное влияние PDO на исследуемый регион, которое не учитывается в выполненных оценках по ансамблю МЗС. Также полученные оценки будущих изменений ПТВ в рассматриваемом регионе не способны учесть влияние еще не произошедших крупных извержений вулканов.

Заключение

В работе выполнена оценка возможных изменений среднегодовой ПТВ в регионе, включающем территорию и окраинные моря России, а также северо-западную часть Тихого океана, до 2099 г., для чего используются осредненные по ансамблю данные 33 МЗС проекта CMIP6, полученные в рамках четырех сценариев SSP, отвечающих различным уровням антропогенного радиационного форсинга (эмиссии CO₂ в результате хозяйственной деятельности людей). Анализ долгосрочных изменений климата основан на сравнении аномалий ПТВ, осредненных за 30-летние периоды. Для верификации модельных результатов проанализировано потепление, произошедшее в регионе с 1940–1969 до 1994–2023 гг., для чего использованы данные как европейского реанализа ERA5 с пространственным разрешением 0.25°, так и МЗС проекта CMIP6 с более грубым разрешением (в основном 1.0–2.0°).

Данные реанализа ERA5 показывают, что от 1940–1969 к 1994–2023 гг. средняя ПТВ в регионе увеличилась на 1.1 °С; МЗС дают близкие средние темпы повышения ПТВ, что обосновывает применение в работе их прогнозных оценок. Сценарии SSP слабого, умеренного и значительного радиационного форсинга (антропогенных выбросов CO₂) показывают близкие результаты с увеличением средней ПТВ по региону на 1.2–1.5 °С от 1994–2023 до 2024–2053 гг. Напротив, к концу XXI в. средняя ПТВ в регионе повысится

на 1.7, 2.7, 3.8 или 4.8 °C соответственно изменениям содержания парниковых газов в атмосфере, которое задано в сценариях SSP.

Почти на всей территории региона ПТВ увеличилась в среднем на 1.2 °C от 1940–1969 к 1994–2023 гг., а в некоторых районах Приморского, Хабаровского и Камчатского краев отрицательные среднегодовые температуры сменились положительными. Сходные результаты получены по ансамблю МЗС СМIP6, что обосновывает применение их прогнозных оценок для суши. От 1994–2023 к 2070–2099 гг. потепление на суше ожидается равным 2.0–2.1, 3.0–3.5, 4.7–5.3 и 6.1–6.6 °C для сценариев SSP1-2.6 (с быстрым сокращением выбросов), SSP2-4.5 (с медленным сокращением выбросов), SSP3-7.0 (с удвоением выбросов к концу столетия) и SSP5-8.5 (с утроением выбросов к концу столетия) соответственно.

Как показывают данные реанализа ERA5, от 1940–1969 к 1994–2023 гг. увеличение ПТВ над морскими акваториями происходило весьма неравномерно. Значительное потепление в северной части Охотского моря (до 2 °C и более) и в прибрежных районах северо-западной части Берингова моря (до 1.0–1.2 °C) можно объяснить многолетним снижением ледовитости [6, 19]. Район Охотского моря восточнее о-ва Сахалин является единственным в регионе, где ПТВ снизилась на 0.2–0.6 °C. Выявление этих локальных особенностей стало возможным благодаря высокому пространственному разрешению реанализа ERA5. Увеличение ПТВ ослабевало в направлении с северо-запада на юго-восток региона, т.е. с удалением от суши, и составило только 0.2–0.6 °C в северо-западной части Тихого океана, что, по-видимому, можно связать с влиянием PDO и стабилизирующей ролью океана. В итоге от 1940–1969 к 1994–2023 гг. термический контраст между океаном и сушей сократился в среднем на 0.8 °C, что соответствует имеющимся представлениям об ослаблении восточноазиатского муссона [6].

Результаты по данным мультимодельного ансамбля СМIP6 в период от 1940–1969 к 1994–2023 гг. соответствуют пространственной картине над морскими акваториями по данным ERA5 с учетом меньшей детальности из-за более грубого пространственного разрешения МЗС, но завьшают увеличение ПТВ северо-западной части Тихого океана. Последнее можно объяснить тем, что эффекты PDO, ослабляющие увеличение ПТВ в этом районе, нивелируются при осреднении по ансамблю моделей СМIP6.

Следует иметь в виду, что в проекциях на будущее можно до определенной степени учесть изменения антропогенного воздействия, но невозможно предугадать извержения вулканов, которые окажут влияние на радиационный форсинг, что привносит дополнительную неопределенность в полученные результаты. Тем не менее их можно рассматривать как первое приближение к описанию будущего состояния климатической системы региона.

В работе не обсуждаются возможные изменения атмосферной циркуляции, в частности, ветрового режима, и естественных климатических процессов, таких как PDO и ENSO, а также системы восточноазиатского муссона; не обсуждаются и имеющие место различия тенденций по сезонам. Эти вопросы оставлены для будущих исследований.

Благодарности. Данное исследование выполнено 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».

Acknowledgments. I.V. Serykh carried out this study within the framework of the state assignment of the P.P. 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 role of the ocean in climate formation”. O.O. Trusenкова carried out this study within the framework of the state assignment of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences on topic No. 124022100079-4 “Study of the structure and dynamics of the World Ocean waters under conditions of modern climate change”.

Литература

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 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. doi: 10.1017/9781009157896.
2. 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.
3. 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. P. 1937–1958.
4. Report of Working Group 29 on Regional Climate Modeling. PICES Sci. Rep. No. 54 / Eds Jang C.J., Curchitser E. Sidney, Canada: PICES. 2018. 177 p.
5. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научно-технологические публикации, 2022. 676 с.
6. Костяной А.Г., Еремина Т.Р., Иванов В.В., Лобанов В.Б., Кровнин А.С., Амосова В.М., Афанасьев Д.Ф., Барабанов В.В., Белоусов В.Н., Волощук Е.В., Гинзбург А.И., Гордеева С.М., Долгов А.В., Жукова С.В., Зезера А.С., Зуенко Ю.И., Лардыгина Е.Г., Лебедев С.А., Лучин В.А., Мезенцева Л.И., Михайлова А.В., Разинков В.П., Ростов И.Д., Серых И.В., Трусенкова О.О., Устинова Е.И., Хен Г.В. Морские природные системы // Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научно-технологические публикации, 2022. С. 192–238.
7. Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Многолетние изменения термических условий на поверхности дальневосточных морей и СЗТО и их связь с крупномасштабными климатическими процессами // *Известия ТИНРО*. 2022. Т. 202, № 1. С. 187–207.
8. Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Рудых Н.И. Климатические изменения термических условий в тихоокеанской субарктике в условиях современного глобального потепления // *Морской гидрофизический журн*. 2021. Т. 37, № 2. С. 162–178.
9. 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. P. 1069–1080.
10. Бышев В.И., Нейман В.Г., Пономарев В.И., Романов Ю.А., Серых И.В., Цурикова Т.В. Роль глобальной атмосферной осцилляции в формировании климатических аномалий Дальневосточного региона России // *Докл. Академии наук*. 2014. Т. 458, № 1. С. 92–96.
11. 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 // *Изв. ТИНРО*. 2019. Т. 199, № 4. С. 163–178.
12. Серых И.В., Толстиков А.В. Климатические изменения температуры воздуха западной части российской Арктики в 1940–2099 гг. по данным ERA5 и моделям CMIP6 // *Арктика: экология и экономика*. 2024. Т. 14, № 3. С. 334–349.
13. 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.
14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc*. 2020. N 146. P. 1999–2049.
15. Huang B., Liu C., Banzon V. et al. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1 // *J. of Climate*. 2021. Vol. 34. P. 2923–2939.
16. Климатологические нормы ВМО // Всемирная метеорологическая организация. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://community.wmo.int/en/wmo-climatological-normal> (дата обращения: 05.08.2024).
17. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker et al. (eds.) Cambridge Univ. Press. 2013. 1535 p.
18. 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. P. 491–508.
19. Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // *Изв. ТИНРО*. 2016. Т. 185. С. 228–239.
20. Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Communications Earth & Environment*. 2022. Vol. 3. Artno. 168. 10 p.
21. Pacific Decadal Oscillation (PDO) // National Centers for Environmental Information NOAA. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nci.noaa.gov/access/monitoring/pdo/> (дата обращения: 26.08.2024).
22. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res*. 2003. Vol. 108, N D14. 4407.

References

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 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. doi:10.1017/9781009157896.
2. 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, 42, 153–168.
3. 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, 9, 1937–1958.
4. Report of Working Group 29 on Regional Climate Modeling. PICES Sci. Rep. No. 54 / Eds Jang C.J., Curchitser E.; PICES: Sidney, Canada. 2018; 177 p.
5. Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation / edited by V.M. Kattsov; Roshydromet. St. Petersburg: Science-intensive technologies, Russia, 2022; 676 p. (In Russian)
6. Kostyanov, A.G.; Eremina, T.R.; Ivanov, V.V.; Lobanov, V.B.; Krovnin, A.S.; Amosova, V.M.; Afanasyev, D.F.; Barabanov, V.V.; Belousov, V.N.; Voloshchuk, E.V.; Ginzburg, A.I.; Gordeeva, S.M.; Dolgov, A.V.; Zhukova, S.V.; Zezera, A.S.; Zuenko, Yu.I.; Lardygina, E.G.; Lebedev, S.A.; Luchin, V.A.; Mezentseva, L.I.; Mikhailova, A.V.; Razinkov, V.P.; Rostov, I.D.; Serykh, I.V.; Trusenkova, O.O.; Ustinova, E.I.; Hen, G.V. Marine natural systems. In *Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation* / edited by V.M. Kattsov; Roshydromet. St. Petersburg: Science-intensive technologies, Russia, 2022; 192–238. (In Russian)
7. Hen, G.V.; Ustinova, E.I.; Sorokin, Yu.D. Long-term changes in thermal conditions on the surface of the Far Eastern seas and the North-West Pacific Ocean and their relationship with large-scale climatic processes. *Izvestiya TINRO*. 2022, 202(1), 187–207. (In Russian)
8. Rostov, I.D.; Dmitrieva, E.V.; Rudykh, N.I. Climatic changes in thermal conditions in the Pacific subarctic under modern global warming. *Marine Hydrophysical Journal*. 2021, 37(2), 162–178. (In Russian)
9. 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, 78, 1069–1080.
10. Byshev, V.I.; Neiman, V.G.; Ponomarev, V.I.; Romanov, Yu.A.; Serykh, I.V.; Tsurikova, T.V. A role of the Global Atmosphere Oscillation in forming the climatic anomalies in Russian Far Eastern region. *Doklady Earth Sciences*. 2014, 458(1), 92–96. (In Russian)
11. Hen, G.V.; Ustinova, E.I.; Sorokin, Yu.D. Variability and interrelationship 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 Russian)
12. 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, 14(3), 334–349. (In Russian)
13. 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, 3461–3482.
14. Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020, 146, 1999–2049.
15. Huang, B.; Liu, C.; Banzon, V. et al. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST). Version 2.1. *Journal of Climate*. 2021, 34, 2923–2939.
16. WMO Climatological Normals. World Meteorological Organization. Available online: <https://community.wmo.int/en/wmo-climatological-normals> (accessed on 05 August 2024). (In Russian)
17. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker et al. (eds). Cambridge Univ. Press. 2013; 1535 p.
18. 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, 11, 491–508.
19. Pishchalnik, V.M.; Romanyuk, V.A.; Minervin, I.G.; Batukhtina, A.S. Analysis of the dynamics of ice coverage anomalies in the Sea of Okhotsk in the period from 1882 to 2015. *Izvestia TINRO*. 2016, 185, 228–239. (In Russian)
20. Rantanen, M.; Karpechko, A.Y.; Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*. 2022, 3, 168.
21. Pacific Decadal Oscillation (PDO). National Centers for Environmental Information NOAA. Available online: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/pdo/> (accessed on 26 August 2024).
22. Rayner, N.A.; Parker, D.E.; Horton, E.B.; Folland, C.K.; Alexander, L.V.; Rowell, D.P.; Kent, E.C.; Kaplan, A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.* 2003, 108(D14), 4407.

Статья поступила в редакцию 27.08.2024; одобрена после рецензирования 23.10.2024; принята к публикации 18.11.2024.

The article was submitted 27.08.2024; approved after reviewing 23.10.2024; accepted for publication 18.11.2024.