



Оценка изменчивости среднегодовой температуры воздуха в климатических моделях для территории Камчатского края

Никита Иванович ТАНАНАЕВ^{1,2}

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник
tanni@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>

Максим Аркадьевич ТИМОФЕЕВ²

инженер-исследователь, аспирант
m.a.timofeev@s-vfu.ru

¹ Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

Аннотация. В работе исследуются результаты воспроизведения современного климата Камчатского края моделями проекта CMIP6, эксперимент historical (69 моделей). Используются данные о приземной температуре воздуха в месячном разрешении, осредненные по годам и формирующие ряды среднегодовой температуры воздуха в пределах административных границ Камчатского края. Среднегодовая температура воздуха по всему пулу моделей составила -5.3 ± 2.6 °C (медиана \pm межквартильный интервал) в 1961–1990 гг., -4.5 ± 3.0 °C в 1981–2010 гг., изменение между периодами $+0.8 \pm 0.3$ °C. Пул моделей в зависимости от средней температуры в базовом периоде, был разделен на три группы: холодная (17 моделей), средняя (35 моделей) и теплая (17 моделей). Все температурные группы моделей сходятся в оценке современного потепления климата Камчатки в пределах от $+0.73$ до $+0.78$ °C между периодами 1961–1990 и 1981–2010 гг., что согласуется с другими оценками. Выполнен анализ различий между модельными семействами, в каждое из которых входит один или несколько (до 12) модельных вариантов, различающихся параметризацией или форсингом. Показано, что различия внутри одной семьи климатических моделей могут быть выше, чем между семьями, и определяются конкретными способами воспроизведения теплообмена в океане и параметризациями климатической функции атмосферных аэрозолей. Выполнена статистическая оценка временных рядов температуры воздуха как в среднем по региону, так и в отдельных модельных ячейках в оригинальном разрешении каждой климатической модели. Подавляющее большинство моделей воспроизводит статистически значимый тренд повышения СГТВ с интенсивностью от $+0.4$ до $+0.45$ °C за 10 лет (оценка Тейла-Сена), начало проявления статистически значимого потепления климата Камчатки относится к 1989 г. Полученные результаты характеризуют основные тенденции изменений климата Камчатского края и будут использованы для создания регионального сценарного климатического прогноза.

Ключевые слова: климатические модели, среднегодовая температура воздуха, Камчатский край, региональный климат, межмодельная вариабельность

Для цитирования: Тананаев Н.И., Тимофеев М.А. Оценка изменчивости климатических моделей температуры на территории Камчатского края// Тихоокеанская география. 2025. № 4. С. 48–61. https://doi.org/10.35735/26870509_2025_24_4.

Assessment of the mean annual air temperature variability in climate models for the Kamchatsky Krai

Nikita I. TANANAEV^{1,2}

Candidate of Geographical Sciences, Leading research associate
tanni@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>

Maxim A. TIMOFEEV²

engineer-researcher, Postgraduate student
m.a.timofeev@s-vfu.ru

¹ Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

² North-Eastern Federal University named M. K. Ammosov, Yakutsk, Russia

Abstract. This research studies the results of the reproduction of the contemporary climate of the Kamchatsky Krai by the CMIP6 (Climate Model Intercomparison Project, phase 6) global climate models in the ‘historical’ experiment (69 models). The data on near-surface air temperature in monthly resolution, averaged by years and forming mean annual air temperature (MAAT) time series within the administrative boundaries of Kamchatsky Krai are used. The MAAT value across all models is -5.3 ± 2.6 °C (median and interquartile range) for the 1961–1990 period, -4.6 ± 3.0 °C for the 1981–2010 period, and inter-period MAAT change is assessed to be $+0.8 \pm 0.3$ °C. The pool of models was divided into three groups based on the MAAT value in the reference period (1961–1990): cold (14 models), medium (38 models), and warm (17 models). All temperature groups of the models also agree in estimating the modern warming of Kamchatka’s climate within the range from $+0.73$ to $+0.78$ °C between the 1961–1990 and 1981–2010 periods. We also performed the analysis of differences between model families, each including one or several, up to 12, model variants including those differing in parametrization (physics) or initial forcing. It is shown that the difference within a single family of climate models can be higher than between families and is determined by particular ways of reproducing heat and mass transfer in the ocean and parameterization of the climatic function of atmospheric aerosols. Statistical assessment of the MAAT time series was performed both on regional average basis and for each model cell in the original resolution of each climate model. The majority of models reproduce a statistically significant upward MAAT trend from $+0.4$ to $+0.45$ °C per decade (Theil-Sen estimate). Regional warming in the Kamchatka region becomes statistically significant around 1989 (Pettitt test). The results of the present study quantify the leadind trend of MAAT increase in Kamchatsky Krai and will be used in the development of the regional scenario-based climate projections.

Keywords: climate models, mean annual air temperature, Kamchatsky Krai, regional climate, inter-model variability

For citation: Tananaev N.I., Timofeev M.A. Assessment of the mean annual air temperature variability in climate models for the Kamchatsky Krai. *Pacific Geography*. 2025;(4):48-61. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2025_24_4.

Введение

Современное потепление климата на территории Камчатского края следует в тренде глобального роста среднегодовой и сезонной температуры воздуха. При этом оно имеет интенсивность вдвое большую, чем в среднем по Северному полушарию [1–3], сопровождается уменьшением скорости ветра [3] при отсутствии значимых тенденций в изменении годовой и сезонной суммы атмосферных осадков [2]. Изменение климатических переменных неравномерно распределено по территории края, что определяется географи-

ческим положением региона, имеющего меридиональную ориентацию и сложный вулканический рельеф, и влиянием окружающих морей [4].

Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата нередко связаны с негативным воздействием на условия жизни человека и функционирования инженерных систем, наиболее уязвимыми к которому в первую очередь оказываются наиболее удаленные регионы и поселения, ресурсы которых недостаточны для реагирования на климатические кризисы [5]. Многочисленные потенциальные факторы риска включают, помимо увеличения температуры воздуха, также уменьшение годовой и сезонной суммы осадков, изменение сроков замерзания и вскрытия рек, уменьшение продолжительности стояния снежного покрова. Климатические изменения вызывают сопряженную трансформацию экосистем Камчатки, пока незначительную, но уже находящую подтверждение в опросах коренных жителей районов полуострова [6], существует, в частности, угроза влияния этих изменений на условия воспроизводства лососевых рыб.

Современный климат Камчатки по-прежнему изучен слабо, основные материалы и описания изложены в обобщениях [3, 4] и опираются на точечные данные метеостанций Камчатского УГМС, которые лишь отчасти учитывают огромное природно-климатическое разнообразие региона. Модели реанализа использовались фрагментарно для описания климата отдельных районов Камчатки (бассейн р. Пенжина) и показали хорошее воспроизведение общих тенденций климатических флуктуаций при существенных систематических погрешностях [7]. Глобальные климатические модели – важный инструмент для построения климатических проекций будущего, однако для территории севера Сибири и Дальнего Востока детальный анализ моделей реанализа и результатов климатического моделирования практически не выполнялся, есть лишь несколько работ [8–10]; качество воспроизведения современного климата Камчатки этими моделями остается неопределенным.

Реагирование на опасности, связанные с изменениями климата, как и использование потенциально возникающих преимуществ, требует регионального планирования адаптационных мероприятий [11]. Необходимость в дополнительном внимании при планировании мер адаптации на территории Камчатки отмечена в исследовании [12], посвященном сценарной оценке погодно-климатической комфортности на территории России до 2050 г. Глобальные климатические модели, при всех связанных с их использованием неопределенностях, единственный на данный момент физически обоснованный инструмент прогнозирования будущих изменений климата. В шестой фазе проекта сравнения климатических моделей CMIP6 (Climate Model Intercomparison Project) представлены 134 модели (включая варианты одной модели), разрабатываемые в 53 исследовательских центрах по всему миру. Точность воспроизведения регионального климата различается от модели к модели, что приводит к необходимости отбора оптимальных моделей и построению их региональных ансамблей [10, 13].

Полуостров Камчатка располагается в умеренном климатическом поясе; северная, материковая часть края – в субарктическом поясе. Климат Камчатки формируется под влиянием радиационных и циркуляционных факторов, а также окружающих морей [4]. Северные районы находятся в области влияния отрогов Сибирского антициклона [7], для южных районов ведущую роль играет циклоническая циркуляция зимнего периода, когда над территорией региона проходит около половины из более 100 циклонов [4, 14]. Ошибочно считается [1], что на западном побережье Камчатки среднегодовая температура воздуха выше, чем на восточном, вследствие тепляющего влияния океанической циркуляции. По литературным данным, однако, тепляющее влияние Берингова моря и Тихого океана значительно больше, чем Охотского моря, которое оказывает, скорее, охлаждающее влияние на протяжении большей части года [4, 15]. В связи с этим восточное побережье систематически оказывается теплее западного, особенно в южной части полуострова. В любом случае, внутригодовая и многолетняя изменчивость термического режима прилегающих акваторий – один из существенных факторов, влияющих на среднегодовую температуру приземного воздуха Камчатского края.

Характерные черты климата края – избыточная увлажненность, умеренно холодный температурный режим, сильные ветры, преобладание пасмурной погоды, длинные многоснежные зимы. По данным Камчатского УГМС, значение среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) меняется от -8°C на севере до $+2^{\circ}\text{C}$ на юго-восточном побережье; положительная СГТВ фиксируется лишь в южной половине восточного побережья и на крайнем юго-западе Камчатки [1–4]. Снег лежит на большей части региона свыше 200 дней в году, а значительный объем выпадающего снега делает Камчатку самым многоснежным регионом России [16].

Начиная с 1980-х гг. на территории полуострова Камчатка по данным десяти репрезентативных метеостанций отмечается увеличение роста СГТВ с интенсивностью до $+0.37^{\circ}\text{C}/10$ лет [1, 2]. Положительный тренд за последние 60 лет был обнаружен в данных всех рассмотренных метеостанций. В конце 1980-х гг. в ведении Камчатского УГМС находилось 58 станций, но из-за сокращения финансирования в 1990-х гг. к настоящему времени удалось сохранить лишь 34 станции, которые проводят метеорологические наблюдения, и только 15 из них имеют продолжительность наблюдений больше 80 лет. Данный факт указывает на необходимость применения реанализа и климатических моделей для обеспечения климатической информацией при планировании мероприятий по адаптации к изменениям климата. Согласно докладу [17], территория Камчатки попадает в перечень областей, где в середине XXI в. ожидается увеличение непрерывной продолжительности засушливых периодов; ожидается учащение проявления других климатических рисков [18].

Данная работа посвящена анализу воспроизведения полей СГТВ на территории Камчатского края глобальными климатическими моделями проекта CMIP6, описанию межмодельной изменчивости и значимости тенденций изменения СГТВ. Полученные результаты будут использованы для подбора оптимального ансамбля климатических моделей для территории Камчатского края, лягут в основу регионального климатического прогноза, послужат основанием для планирования адаптационных мероприятий в регионе и разработки документов стратегического планирования.

Материалы и методы

В работе использованы данные 69 глобальных климатических моделей проекта CMIP6, полученные из официального репозитория [19], для переменной *tas* (приземная температура воздуха), эксперимент *historical*, с временным разрешением один месяц, за период с 1960 по 2014 г. (финальный год модельных расчетов в данном эксперименте). Модели использовали различные календари (модельный год имеет 365 или 360 дней, отличается учетом високосных лет) и имели разное пространственное разрешение: от 50 км у модели CNRM-CM6-1-HR (Франция) до 500 км у модели MIROC-ES2L (Япония). Область исследований ограничена районом от 48° до 66° с.ш., от 150° до 178° в.д.

Конфигурация климатических моделей CMIP6 кодируется четырьмя индексами: *r* – реализация, *i* – метод инициализации, *p* – версия параметризации физических процессов, *f* – форсинг, набор начальных и граничных условий. В данной работе использованы преимущественно базовые варианты моделей *r1ilp1f1*, однако в анализ включены также варианты с альтернативными параметризациями (например, физики облаков) и форсингом. Такие варианты кодируются другими цифрами после соответствующих индексов. Так, указание в тексте работы на вариант модели ‘*r4*’ соответствует конфигурации *r1ilp4f1*, на вариант модели ‘*f2*’ – конфигурации *r1ilp1f2*.

Автоматизированная обработка модельных данных и построение растровых покрытий для дальнейшего анализа выполнено в RStudio, среде разработки для языка R, с помощью авторских скриптов, разработанных в лаборатории по изучению климата и экосистем северных регионов СВФУ им. М.К. Аммосова. Расчет средней по территории Камчат-

ского края СГТВ выполнялся с помощью функции *exact_extract()* пакета ‘*exactextractr*’ [20] для периодов 1961–1990 гг. (базовый) и 1981–2010 гг. (современный); также рассчитывалось изменение СГТВ между периодами. Для каждой модели был также построен временной ряд значений СГТВ для территории Камчатского края и для каждой модельной ячейки за период с 1961 по 2010 гг. Для детального анализа по данным базового периода (1961–1990 гг.) климатические модели разделены на группы: холодная, средняя, теплая; использовались значения μ – медианное значение СГТВ, °C; IQR – межквартильный размах (IQR, $Q3 - Q1$) по множеству моделей, °C. К средней группе отнесены модели, у которых значение СГТВ попадает в диапазон между $Q1$ (25 %) и $Q3$ (75 %); к группе «холодных» – модели с $СГТВ < Q1$; к группе «теплых» – модели с $СГТВ > Q3$. Данный подход основан на квартилях эмпирического распределения, выгодно отличается универсальностью и возможностью применения для любых метеопараметров.

Анализ временных рядов СГТВ, средних по региону и в каждой модельной ячейке, проводился для оценки: 1) нормальности (критерий Шапиро-Уилка); 2) стационарности (критерий Манна-Кендалла); 3) величины тренда для пикселей, в которых ряды найдены нестационарными (оценка Тейла-Сена); 4) наличия нарушения стационарности в форме «разрыва» (тест Петтитта). Использованы пакеты ‘*stats*’ и ‘*trend*’ для среды программирования RStudio, функции *shapiro.test()*, *mk.test()*, *sens.slope()*, *pettitt.test()* соответственно.

Результаты и их обсуждение

Среднегодовая температура воздуха

Камчатский край в представлении глобальных климатических моделей – регион с отрицательной СГТВ (в среднем по территории). В базовом периоде (1961–1990 гг.) медианное значение СГТВ Камчатки (по пулу моделей) $\mu = -5.3$ °C, при $IQR_{1961-1990} = 2.6$. В современном периоде (1981–2010 гг.) $\mu = -4.5$ °C, $\sigma_{1981-2010} = 2.60$. Изменение СГТВ между периодами, таким образом, оценивается моделями в $+0.8$ °C, что соответствует выводам работы [3]. Межмодельная вариабельность, оцененная по межквартильному размаху, велика, но значительно больше – абсолютный разброс значений СГТВ, от $+0.1$ °C (модель MIROC-ES2L f2, 1981–2010) до -14.1 °C (модель GISS-E2-2-G p3, 1961–1990) (табл. 1). Все модели, кроме одной, показывают значение СГТВ Камчатского края существенно ниже нуля в обоих периодах.

Подавляющее большинство моделей воспроизводят положительное изменение СГТВ между периодами Δt , в том числе восемь моделей – изменение СГТВ, превышающее $+1$ °C (CESM2-FV2, CMCC-CM2-SR5, CNRM-CM6-1, E3SM-1-0, EC-Earth3, GISS-E2-1-G, GISS-E2-2-H, KACE-1-0-G). Медианное значение Δt по множеству моделей равно $+0.8$ °C, межквартильный размах $+0.3$ °C; полученное значение также соответствует ранее опубликованному [3]. Следуя подходу, изложенному в методической части, к числу наиболее достоверных отнесем модели со значениями Δt в интервале от $+0.6$ до $+0.9$ (от $Q1$ до $Q3$). При отборе моделей для регионального ансамбля дополнительно необходимо учитывать пространственную изменчивость характеристики Δt по территории Камчатского края.

Единственная модель, воспроизводящая в историческом эксперименте устойчивый климат с $\Delta t = 0$ – вариант p4 модели EC-Earth3-AerChem. Это слабо документированный вариант, основанный на альтернативной физике p4, ядро которой – результаты европейского проекта FORCES; в ней учтены и параметризованы некоторые дополнительные процессы, в частности, формирование аэрозолей при волнении моря, и факторы, например, минеральный состав атмосферной пыли и ее оптические свойства (краткий обзор модификаций приведен в отчете FORCES [21, с. 33], полное описание на данный момент не опубликовано).

При распределении по температурным группам к «средним» было отнесено 35 модельных вариантов, к «холодным» – 17, к «теплым» – 17. Отметим, что такое разделе-

Таблица 1

Средние температуры в базовом и современном периодах и изменение температуры между ними

Table 1. The average temperatures in the reference and modern periods and the temperature change between them

Модель	$t_{1961-1990}$	$t_{1981-2010}$	Δt	Модель	$t_{1961-1990}$	$t_{1981-2010}$	Δt
ACCESS-CM2	-6.7	-6.2	0.5	FGOALS-g3	-7.5	-6.8	0.6
ACCESS-ESM1-5	-5.1	-4.1	0.9	FIO-ESM-2-0	-6.3	-5.5	0.8
AWI-CM-1-1-MR	-4.1	-3.4	0.7	GISS-E2-1-G	-9.2	-8.1	1.1
AWI-ESM-1-1-LR	-5.2	-4.6	0.6	GISS-E2-1-G f2	-9.4	-8.6	0.8
BCC-CSM2-MR	-6.5	-6.2	0.3	GISS-E2-1-G f3	-9.6	-8.8	0.8
BCC-ESM1	-6.4	-5.9	0.5	GISS-E2-1-G p3	-8.0	-7.0	0.9
CAMS-CSM1-0	-6.5	-6.3	0.2	GISS-E2-1-G p5	-8.1	-7.3	0.9
CAMS-CSM1-0 f2	-6.5	-5.8	0.7	GISS-E2-1-H	-2.3	-1.7	0.7
CESM2-FV2	-5.3	-4.1	1.3	GISS-E2-1-H f2	-3.2	-2.3	0.9
CESM2-WACCM-FV2	-4.9	-4.1	0.9	GISS-E2-1-H p3	-1.3	-0.7	0.7
CESM2-WACCM	-5.0	-4.1	0.9	GISS-E2-1-H p5	-2.2	-1.6	0.5
CESM2	-4.4	-3.5	0.8	GISS-E2-2-G	-13.2	-12.5	0.7
CIESM	-2.7	-2.0	0.8	GISS-E2-2-G p3	-14.1	-13.6	0.4
CMCC-CM2-HR4	-3.9	-3.1	0.8	GISS-E2-2-H	-7.1	-6.0	1.2
CMCC-CM2-SR5	-4.5	-3.2	1.3	HadGEM3-GC31-MM f3	-6.1	-5.9	0.2
CMCC-ESM2	-4.7	-3.8	1.0	IITM-ESM	-2.6	-2.1	0.5
CNRM-CM6-1-HR f2	-5.5	-4.5	0.9	INM-CM4-8	-6.0	-5.4	0.6
CNRM-CM6-1 f2	-4.5	-3.1	1.3	INM-CM5-0	-3.9	-3.1	0.8
CNRM-ESM2-1 f2	-3.0	-2.5	0.5	IPSL-CM6A-LR-INCA	-2.9	-2.0	0.8
CanESM5-1	-3.2	-2.3	0.9	IPSL-CM6A-LR	-3.0	-2.3	0.7
CanESM5-1 p2	-3.0	-2.2	0.9	KACE-1-0-G	-6.5	-5.5	1.1
CanESM5-CanOE p2	-3.0	-2.1	1.0	MIROC-ES2H p4	-2.5	-1.7	0.8
CanESM5	-2.6	-1.6	0.9	MIROC-ES2L f2	-0.4	0.1	0.5
CanESM5 p2	-3.0	-2.1	1.0	MIROC6	-1.3	-0.9	0.4
E3SM-1-0	-4.5	-3.4	1.1	MPI-ESM-1-2-HAM	-6.5	-6.1	0.5
E3SM-1-1-ECA	-6.5	-5.8	0.8	MPI-ESM1-2-HR	-4.7	-4.2	0.5
E3SM-1-1	-5.8	-5.0	0.8	MPI-ESM1-2-LR	-5.9	-5.0	0.9
E3SM-2-0	-5.4	-4.8	0.6	NESM3	-6.9	-6.1	0.8
EC-Earth3-AerChem	-6.5	-5.8	0.7	NorCPM1	-10.6	-9.9	0.6
EC-Earth3-AerChem p4	-8.3	-8.3	0.0	NorESM2-LM	-4.6	-3.8	0.8
EC-Earth3-CC	-5.2	-4.3	0.9	NorESM2-LM p4	-4.4	-3.7	0.7
EC-Earth3-Veg-LR	-7.3	-6.5	0.9	NorESM2-MM	-6.1	-5.3	0.8
EC-Earth3-Veg	-6.1	-5.3	0.8	SAM0-UNICON	-9.0	-8.3	0.7
EC-Earth3	-7.3	-5.9	1.4	TaiESM1	-8.4	-7.6	0.8
FGOALS-f3-L	-4.8	-4.0	0.8				

ние – относительное и условное, свойственно только пространству модельного пула, а не физической реальности; модели признаются теплыми или холодными относительно друг друга, а не реальных климатических условий. Обоснованное разделение может быть сделано, например, на сопоставлении модельной СГТВ (средней по региону) со значением, определенным по данным климатического реанализа.

Сравнение основных статистических характеристик температурных групп приведено в табл. 2; минимальные и максимальные значения средне-региональной СГТВ t_{min} и t_{max} определены по временным рядам с 1961 по 2010 г. по множеству моделей, попадающих в данную группу, и относятся к конкретному году.

Сравнение параметров климатических моделей по группам
Table 2. Comparison of climate model parameters by groups

Группа	Период 1961–1990 гг.				Период 1981–2010 гг.			
	$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	σ	t_{min}	t_{max}	$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	σ	t_{min}	t_{max}
Теплая	-2.49	1.18	-5.32	+1.92	-1.76	1.13	-4.73	+3.12
Средняя	-5.40	1.26	-9.09	-1.28	-4.62	1.40	-8.09	-0.27
Холодная	-8.86	2.26	-15.97	-4.94	-8.09	2.39	-15.97	-2.65

К «теплой» группе относится 17 модельных вариантов. В этой группе, в данных MIROC-ES2L f2, значение t_{max} выше 0°C отмечается как в базовом периоде ($t_{max} = +1.92^\circ\text{C}$, 1983 г.), так и в современном ($t_{max} = +3.12^\circ\text{C}$, 2000 г.). Две другие модели, GISS-E2-1-H r3 и MIROC6, также воспроизвели СГТВ выше 0°C хотя бы в один год в обоих периодах. Также четыре модели показали максимальную СГТВ выше 0°C только в современном периоде: GISS-E2-1-H, IPSL-CM6A-LR-INCA, ИТМ-ESM, MIROC-ES2H r3. Минимальные СГТВ моделей теплой группы находятся в области значений t_{cp} средней группы (рис. 1).

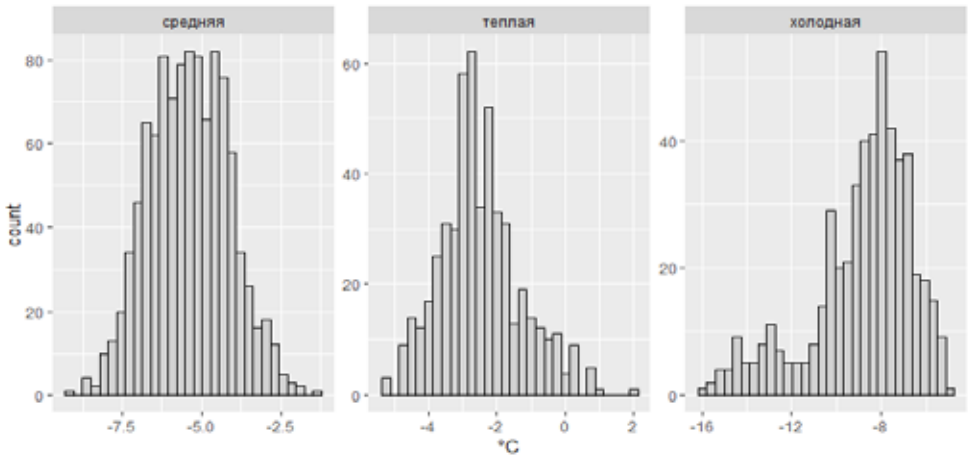


Рис. 1. Гистограммы распределения значений средне-региональных СГТВ по временным рядам с 1961 по 1990 г. (базовый период) по температурным группам

Fig. 1. Histograms of the distribution of climate models by groups in the base period

Средняя группа модельных вариантов – наиболее многочисленная. В ней максимальная СГТВ по обоим периодам находится в области ниже 0°C , а минимальная СГТВ в свою очередь – в области средних значений t_{cp} «холодной» группы.

К «холодной» группе относятся 14 модельных вариантов. Данная группа моделей воспроизводит нереалистично холодный климат Камчатки, что может быть связано с особенностями модельного представления атмосферных аэрозолей и их взаимодействия с облачностью [22], но также чувствительностью моделей к изменению атмосферной концентрации парниковых газов, реакцией ледяного покрова Северного Ледовитого океана или иными причинами. Минимальная СГТВ, равная -15.97°C , отмечена в 1987 г., который относится как к базовому, так и современному периоду, у модели GISS-E2-2-G с альтернативной параметризацией r3, в которой для описания атмосферных аэрозолей используется нестандартный модуль ОМА (One-Moment Aerosol) [23].

Температурные группы моделей различаются не только средними значениями СГТВ, но и величиной стандартного отклонения в их временных рядах, которое увеличивается от теплых моделей к холодным и от базового периода к современному. Последний факт го-

ворит о возрастании неустойчивости модельного климата в современных условиях. Максимальная СГТВ прирастает в модельных группах медленнее, чем максимальная; этого логично ожидать в условиях потепления климата и прироста t_{cp} .

Точность воспроизведения климатической динамики моделями CMIP6 оказывается выше точности воспроизведения абсолютных значений основных климатических переменных. Вне зависимости от группировки среднее по группе изменение СГТВ между периодами находится в интервале от +0.7 до +0.8 °C (см. табл. 2), что соответствует значению, определенному по полному множеству моделей (см. выше). При этом разброс значений Δt наибольший в группе «холодных» моделей, от +0.04 до +1.4 °C, несколько меньше – в средней группе, от +0.15 до +1.34 °C, наименьший – в группе «теплых» моделей, от +0.38 до +0.97 °C.

В соответствии с описанными выше характеристиками (см. табл. 2), модальное значение средне-региональной СГТВ для группы средних моделей в базовом периоде находится в районе –5 °C, для «теплых» моделей – около –2.5 °C, для «холодных» – около –8 °C (рис. 1).

Принадлежность модели к той или иной температурной группе может определяться рядом факторов, однако для Камчатского края как приморского региона [4], по всей видимости, важную роль играет качество воспроизведения температуры поверхности океана (ТПО). Гистограмма распределения СГТВ «холодной» группы характеризуется выраженной бимодальностью. Вторая мода в области значений СГТВ от –13 до –14 °C связана с модельными вариантами GISS-E2-2-G, использующими модуль циркуляции океана GISS Ocean GO1 [24]. Отметим, что воспроизводимые значения СГТВ как минимум в одной модельной семье зависят от описания океанических процессов. В данных других моделей структура температурного поля над полуостровом также тесно связана с процессами в прилегающей акватории и особенностями их описания (рис. 2). Исходное пространственное разрешение приведенных на рисунке моделей одинаково и составляет 250 км, однако они используют разные «океанические» модули (MICOM1.1, FESOM 1.4, COCO4.9 на рис. 2а–в, соответственно), существенно разное пространственное распределение ТПО и СГТВ в южной части полуострова.

Высокие значения ТПО в Охотском море и на западе Северной Пацифики определяют и высокие значения СГТВ в южной и центральной части полуострова; это отепляющее влияние может распространяться и на материковую часть Камчатского края (см. рис. 2б,в).

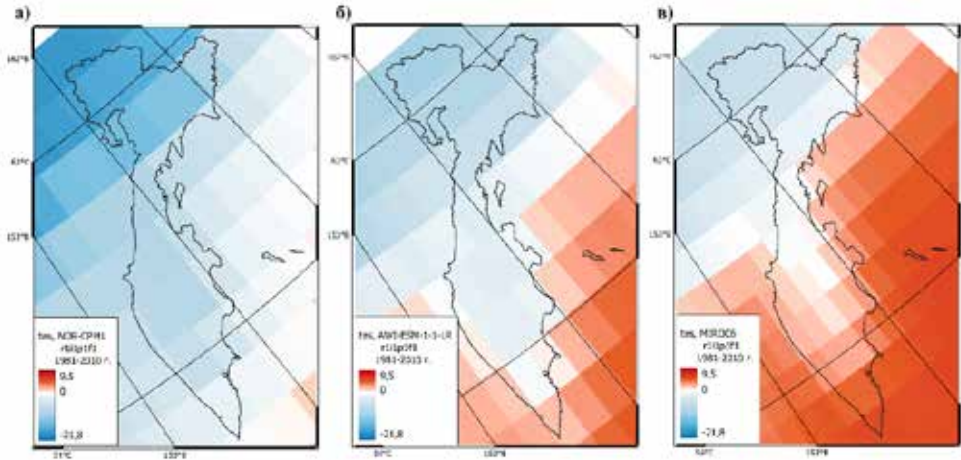


Рис. 2. Пространственное распределение СГТВ в современном периоде (1981–2010 гг.): а) холодная модель Nor-CPM1, б) средняя модель AWI-ESM-1-1-LR, в) теплая модель MIROC6

Fig. 3. Spatial distribution of the average annual temperature in the period 1981–2010. а) Nor-CPM1, б) AWI-ESM-1-1- LR, в) MIROC6

В связи с этим анализ модельной динамики ТПО по ключевым участкам акватории представляется перспективным направлением исследований, так как этот параметр имеет значение для оценки качества воспроизведения СГТВ, а также самостоятельную значимость как один из параметров, влияющих на рыбопродуктивность акваторий Камчатского края, где рыбная отрасль – краеугольный камень экономики региона. По нашему мнению, значительная доля неопределенности модельных оценок пространственно-временной изменчивости СГТВ на территории Камчатского края связана именно с воспроизведением теплового баланса и тепломассопереноса в акватории прилегающих к побережью Камчатки Охотского и Берингова морей, а также Тихого океана.

Статистика модельных семейств

Климатическое моделирование интенсивно развивается в последние десятилетия, модельное разнообразие велико, при этом многие модели используют одинаковые расчетные модули, а «генеалогия кода» описана недостаточно детально [25]. Возникает вопрос о независимой ценности результатов, относящихся к модельным выходам одного семейства, различающимся архитектурой расчетных модулей или иными параметрами. Нами рассмотрены различия между 27 модельными семействами, выделенными по организации-разработчику модели. Девять модельных семейств включают три модели и более (самое многочисленное – семейство GISS), восемь семейств – два модельных варианта, и десять – представлены только одной моделью (рис. 3). Каждая линия на графике соответствует одному модельному варианту.

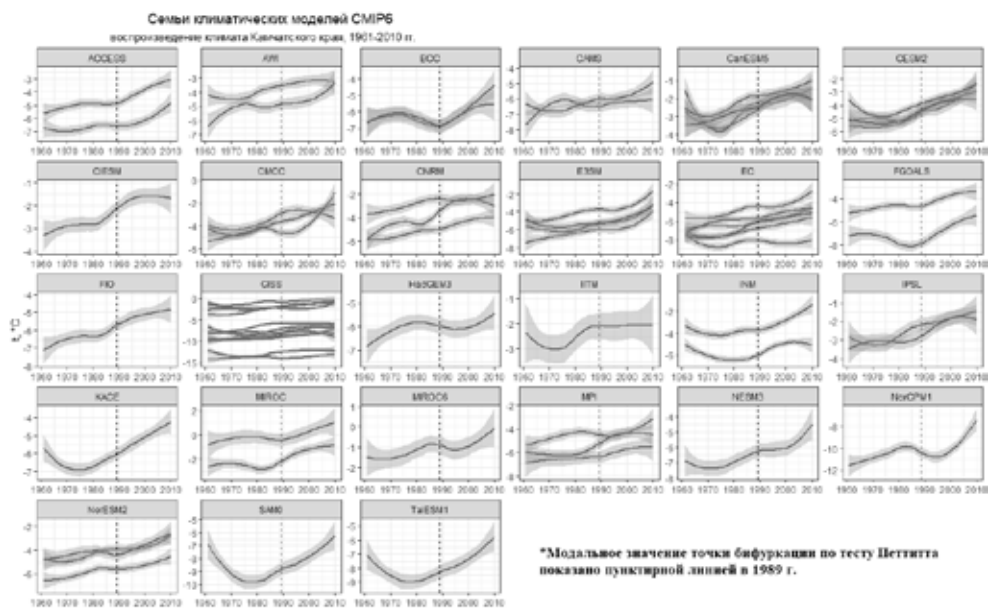


Рис. 3. Временные ряды средне-региональной СГТВ на территории Камчатского края в 1961–2010 гг., воспроизведенные различными семействами климатических моделей

Fig. 3. Dynamics of the average annual air temperature in the Kamchatka Territory, from 1961–2010, by families of climate models

Некоторые семейства представлены разными версиями одной модели, как, например, модель Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (INM-CM4-8 и INM-CM5-0); в некоторых случаях модельные варианты различаются наборами параметризаций и составом модулей (модели семейства EC-Earth3 или CESM2 и CESM2-WACCM) или параметрами расчетной сетки (CESM2 и CESM2-FV2).

Межмодельные различия внутри семейств характеризуются разнообразием паттернов (рис. 3). Они могут быть крайне существенными, как в семействах ACCESS и FGOALS, а могут быть несущественными, как в семействах BCC и IPSL. В семействе GISS отмечается значительная разница между вариантами, фактически – их разделение по трем температурным группам, однако внутри этих групп межмодельные различия сравнительно невелики.

Обсуждение модельных семейств и их различий мотивируется дискуссией о «модельной демократии», иначе говоря – о ценности и равнозначности вклада каждого модельного выхода для более полного и точного описания прогнозируемой реальности в условиях, когда многие модели объединены использованием одних и тех же параметризаций, модулей и фрагментов кода и не могут считаться полностью независимыми реализациями климатического процесса [26]. Выходом из ситуации предполагается использование дискриминированных, или взвешенных ансамблей, хотя выбор конкретной метрики или показателя качества также сталкивается с затруднениями методического характера [27].

Анализ временных рядов в модельных ячейках

Нормальность распределения исследуемой выборки – одно из основных условий применения параметрических статистических методов, по этой причине в первую очередь проводилась проверка нормальности распределений значений СГТВ. Расчет выполнялся для двух временных периодов, для каждой модельной ячейки и для каждой климатической модели. Установлено, что для всех моделей p -значение теста Шапиро-Уилка превышает критический уровень 0.05, поэтому гипотеза нормальности рядов не отклоняется.

Проверка на наличие монотонного тренда (тест Манна-Кендалла) показывает, что таковой присутствует в рядах средне-региональной СГТВ за 1961–2010 гг. по основной массе моделей. Только четыре модельных варианта не указывают на стационарность в некоторых или всех пикселях, p -значение теста больше 0.05 (CAMS-CSM1-0, EC-Earth3-AerChem p4, HadGEM3-GC31-MM f3, ITM-ESM). Несколько моделей воспроизводят отсутствие тренда в северной, материковой части Камчатского края, демонстрируя монотонный тренд на большей части полуострова, подверженной морскому влиянию.

Некоторые модели воспроизводят возрастание СГТВ в течение всего периода, некоторые, особенно относящиеся к «холодной» группе, показывают ход СГТВ, близкий к параболическому: похолодание в базовом периоде сменяется резким потеплением в современном периоде. Здесь отметим, что именно такие модели (например, KACE, SAM0-UNICON, TaiESM1) сравнительно точно воспроизводят период низких температур, который по данным метеостанций относится к 1970-м гг. [1]. Минимум СГТВ в 1970-х гг., воспроизводимый некоторыми «холодными» моделями, соответствует по времени периоду глобального максимума содержания антропогенных сульфатов [28] и может быть связан с параметризациями облачности, в которых сульфаты играют роль центров нуклеации. Без детальной атрибуции неизвестно, каким конкретно фактором управлялось снижение СГТВ в этот период: реакция на внешний форсинг (атмосферная химия), изменчивость стохастического характера, взаимодействия между атмосферой и океаном или другие причины.

В этой связи возникает вопрос о времени начала статистически значимых изменений климата на территории региона. Большинство моделей демонстрируют степ-тренд, или нарушение стационарности в форме «разрыва» на уровне $p < 0.05$ в большинстве модельных пикселей (тест Петтитта). Пространственное распределение p -значений теста Петтитта выглядит однородно, исключения отмечаются у незначительного числа моделей. Нарушение стационарности приходится на вторую половину 1980-х гг. (см. рис. 3), модальное значение точки бифуркации по всему пулу моделей приходится на 1989 г., что сходится с другими региональными обобщениями [29]. В разрезе температурных групп оно меняется от 1987 г. в группе «холодных» моделей до 1990 г. в группе «теплых» моде-

лей и до 1998 г. у средних моделей. Очевидно, ведущую роль здесь играет реактивность моделей и форма температурной кривой в базовом периоде (1961–1990 гг.).

Средняя величина тренда (оценка Тейла-Сена) за период 1961–2010 гг. по всему пулу моделей составляет $+0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, что несколько выше оценок, данных в работах [1–3], от $+0.2$ до $+0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Основной причиной различий, очевидно, следует считать разницу между трендами на метеостанциях и в модельных пикселях, с одной стороны, имеющих большое пространственное осреднение, с другой – закрывающих горные территории и те типы местностей, где сеть метеостанций особенно редка. Наименьший показатель у теплой модели GISS-E2-1-H р5 – $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, а наибольшую интенсивность тренда показывает модель из холодной группы EC-Earth3 – $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. При этом 14 моделей воспроизводят интенсивность тренда больше $+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$; в их числе девять моделей средней группы, три – «холодной» и две – «теплой» группы.

Заключение и выводы

В работе выполнена оценка межмодельной вариабельности в воспроизведении климата Камчатского края в период с 1961 по 2010 г. глобальными климатическими моделями проекта CMIP6 (69 модельных вариантов). Выполнена группировка модельных вариантов по значению медианной СГТВ, анализ модельных семейств, проведен попиксельный анализ нормальности и стационарности рядов СГТВ, определена величина тренда для каждого пикселя каждой модели, рассчитаны средне-региональные значения данных параметров.

В современном периоде (1981–2010 гг.) медианная среднегодовая температура на территории Камчатского края по модельным данным составила $-4.6 \pm 2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Увеличение СГТВ относительно базового периода находится в интервале от $+0.7^{\circ}$ до $+0.8^{\circ}$, интенсивность потепления – от $+0.35$ до $+0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, что соответствует ранее опубликованным результатам, основанным на данных метеостанций [1–3]. Более высокая оценка величины тренда – от $+0.40$ до $+0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, полученная методом Тейла-Сена в ходе анализа рядов в модельных ячейках, учитывает форму температурной кривой в период 1961–2010 гг. Климатический сдвиг в Камчатском крае в сторону потепления приходится на вторую половину 1980-х гг., модальное значение по модельному пулу – 1989 г.

Пул моделей разделен на температурные группы: «холодные», средние и «теплые» модели по значению медианной СГТВ и среднеквадратичной ошибки. Наибольший рост температуры показывают средние модели, а модели «теплой» группы значительно более консервативны. Некоторые «холодные» модели показывают себя более реактивными в отношении изменения атмосферного пула аэрозолей, предположительно – частиц сульфатов небольшого размера. Значимость модуля аэрозолей для корректного описания климатической динамики показывает модельный вариант EC-Earth3-AerChem р4 – единственный, в котором не воспроизводятся современные климатические изменения.

Климатическая динамика на территории Камчатского края в моделях CMIP6 следует глобальным тенденциям возрастания среднегодовой температуры воздуха вследствие радиационных факторов под сильным термическим влиянием Мирового океана. Основная неопределенность модельных оценок изменения среднегодовой температуры связана именно с воспроизведением теплового баланса и тепломассопереноса в акватории прилегающих к побережью Камчатки Охотского и Берингова морей, а также Тихого океана. На примере модельного семейства GISS показано, что воспроизводимые значения СГТВ по территории Камчатки, особенно в южной части полуострова, зависят от модуля описания океана, использованного в модели (GISS или HYCOM). Анализ пространственного распределения СГТВ других климатических моделях также указывает на существенную роль прилегающих акваторий в формировании температурного режима прибрежных территорий.

Полученные результаты важны для сборки регионального ансамбля глобальных климатических моделей для территории Камчатского края и создания сценарного климатического прогноза на период до 2100 г. Необходимым этапом должно стать также сопоставление модельных оценок с данными реанализа для их верификации, в частности, для оценки точности воспроизведения пространственных паттернов климатических изменений, как это сделано в работе [10] для территории Якутии. Выполнение такой верификации и публикация ее результатов планируются в будущем.

На данном этапе исследований уже можно предположить, что кроме оптимального ансамбля моделей и основанного на нем сценарного прогноза, для Камчатского края имеется возможность создавать целевые ансамбли, относительно преувеличивающие вклад одного конкретного фактора в климатическую динамику. Такими могут быть, например, сценарии высоких эмиссий при отсутствии мероприятий по митигации и контроля за атмосферными аэрозолями либо сценарии резкого потепления прилегающих акваторий.

Благодарности. Работа выполнена: в рамках программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030. Дальний Восток» (национальный проект «Наука и университеты»), реализуемой ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга»; плана НИР Научно-исследовательской лаборатории по изучению климата и экосистем северных регионов ИЕН СВФУ по приоритетным направлениям Программы развития СВФУ им. М.К. Аммосова на 2024 и 2025 гг.

Acknowledgements. This research was conducted: under the framework of the program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation “Priority-2030. Far East” (national project “Science and universities”), implemented by Vitus Bering Kamchatka State University; according to the research plan of the Laboratory of Climate and Northern Ecosystems Research, Institute of Natural Sciences, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov within the priority areas of the NEFU Development Program for 2024 and 2025 years.

Литература

1. Шкаберда О.А., Василевская Л.Н. Оценка изменений температуры воздуха на Камчатке за последние 60 лет // Вестник ДВО РАН. 2013. № 3 (169). С. 69–77.
2. Шкаберда О.А., Василевская Л.Н. Многолетняя изменчивость температурно-влажностного режима на полуострове Камчатка // Известия ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 217–233.
3. Шкаберда О.А. Современные тенденции изменения климата Камчатки: Автореф. дис. ...канд. геогр. наук. Казань: КФУ, 2015. 22 с.
4. Кондратьев В.И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеиздат, 1974. 204 с.
5. Emmerling J., Andreoni P., Charalampidis I. [et al.] A multi-model assessment of inequality and climate change // Nature Climate Change. 2024. Vol. 14. P. 1254–1260.
6. Чернягина О.А., Кириченко В.Е. Камчатский край. Климатические тренды, общественное восприятие изменений и отклик экосистем // Человек и природа в Сибири под ред. Э. Кастен. 2021. С. 201–236.
7. Шиловцева О.А., Шабанова Н.Н., Кононова Н.К. Изменения климата в бассейне реки Пенжины по второй половине XX – начале XXI в. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2015. Вып. 37. С. 21–32.
8. Тананаев Н.И. Подбор оптимальной модели климатического реанализа по среднегодовой температуре воздуха для территории Республики Саха (Якутия) // Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле». 2023. № 2. С. 88–101.
9. 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.
10. Tananaev N. Regional ensemble of CMIP6 climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia // Polar Science. 2024. Vol. 41. 101066.
11. Дьяков М.Ю., Михайлова Т.Р. Актуальные вопросы климатической адаптации Камчатского края // Научные труды ВЭО России. 2024. Т. 247. С. 390–414.
12. Макоско А.А., Матешева А.В., Емелина С.В. О тенденциях рисков для здоровья от загрязнения атмосферы и изменения погодно-климатической комфортности на территории России до 2050 года // Метеорология и гидрология. 2024. № 2. С. 107–119.
13. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на гидросферу // Лед и снег. 2015. Т. 53, № 1. С. 83–92.

14. Кацыка А.П., Скрипков Л.В. Климат Петропавловска-Камчатского // Вопросы географии Камчатки. Вып. 3. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное книжное издательство, 1965. С. 11–15.
15. Хен Г.В., Басюк Е.О., Сорокин Ю.Д. Термические условия на поверхности Берингова и Охотского морей в начале 21-го века на фоне полувековой изменчивости // Известия ТИНРО. 2008. Т. 153. С. 254–263.
16. Национальный атлас России: в 4 т. Т. 2. Природа. Экология. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nationalatlas.ru/tom2/146-150.html> (дата обращения: 15.12.2024).
17. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме // Наукоемкие технологии, 2022. 124 с.
18. План адаптации к изменениям климата Камчатского края [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minpriir.kamgov.ru/document/file/download?id=159212> (дата обращения: 15.04.2025).
19. Репозиторий климатических моделей CMIP6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://esgf-node.ipsl.fr/search/cmip6-ipsl/sgd> (дата обращения: 15.12.2024).
20. Baston, D. exactextractr: Fast extraction from raster datasets using polygons. R package version 0.10.0 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://CRAN.R-project.org/package=exactextractr> (дата обращения: 15.12.2024).
21. FORCeS. Constrained aerosol forcing for improved climate projections – GA825205. Final scientific summary report (D9.5). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://forces-project.eu/wp-content/uploads/2023/02/FORCeS_Midterm_Scientific_Report_2022.pdf (дата обращения: 15.04.2025).
22. Flynn C.M., Huusko L., Modak A., Mauritsen T. Strong aerosol cooling alone does not explain cold-biased mid-century temperatures in CMIP6 models // Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. Vol. 23, is. 23. P. 15121–15133.
23. DeLessio M.A., Tsigaridis K., Bauer S.E. [et al.] Modeling atmospheric brown carbon in the GISS ModelE Earth system model // Atmospheric Chemistry and Physics. 2024. Vol. 24, is. 10. P. 6275–6304.
24. Rind D., Orbe C., Jonas J. [et al.] GISS Model E2.2: A climate model optimized for the middle atmosphere – Model structure, climatology, variability, and climate sensitivity // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. Vol. 125, is. 10. e2019JD032204.
25. Kuma P., Bender F.A.-M., Jönsson A.R. Climate model code genealogy and its relation to climate feedbacks and sensitivity // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2023. Vol. 15. e2022MS003588.
26. Knutti R. The end of model democracy? // Climatic Change. 2010. Vol. 102. P. 395–404.
27. Knutti R., Sedlacek J., Sanderson B.M. [et al.] A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, is. 4. P. 1909–1918.
28. 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. С. 163–178.
29. Iizuka Y., Uemura R., Matsui H. [et al.] High flux of small sulphate aerosols during the 1970s reconstructed from the SE-Dome ice core in Greenland // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2022. Vol. 127, is. 17. e2022JD036880.

References

1. Shkaberda, O.A.; Vasilevskaya, L.N. Assessment of air temperature changes in Kamchatka over the past 60 years. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2013, 3(169), 69–77. (In Russian)
2. Shkaberda, O.A.; Vasilevskaya, L.N. Long-term variability of temperature and humidity conditions on the Kamchatka Peninsula. *Bulletin of TINRO*. 2014, 178, 217–233. (In Russian)
3. Shkaberda, O.A. Modern trends in climate change in Kamchatka. *Ph.D. Thesis Abstract*. Kazan University: Kazan, Russia. 2015; 22 p. (In Russian)
4. Kondratyuk, V.I. Climate of Kamchatka. Gidrometeoizdat: Moscow, Russia, 1974; 204 p. (In Russian)
5. Emmerling, J.; Andreoni, P.; Charalampidis, I. [et al.] A multi-model assessment of inequality and climate change. *Nature Climate Change*. 2024, 14, 1254–1260.
6. Chernyagina, O.A.; Kirichenko, V.E. Kamchatka region. Climate trends, public perception of changes and response of ecosystems. In *Man and Nature in Siberia* (edited by E. Kasten). BoD: Nordershtedt, Germany. 2021, 201–236. (In Russian)
7. Shilovtseva, O.A.; Shabanova, N.N.; Kononova, N.K. Climate changes in the Penzhina River basin in the second half of the 20th – early 21st centuries. *Studies of aquatic biological resources of Kamchatka and the northwestern part of the Pacific Ocean*. 2015, 37, 21–32. (In Russian)
8. Tananaev, N.I. Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Sakha (Yakutia) Republic, based on mean annual air temperature. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*. 2023, 2, 88–101. (In Russian)
9. Serykh, I.V.; Trusenkov, 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, 2, 48–62. (In Russian)
10. Tananaev N. Regional ensemble of CMIP6 climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia. *Polar Science*. 2024, 41, 101066.

11. Dyakov, M.Yu.; Mikhailova, T.R. Current issues of climate adaptation of the Kamchatka Territory. *Scientific works of the VEO of Russia*. 2024, 247, 390–414. (In Russian)
12. Makosko, A.A.; Matesheva, A.V.; Emelina, S.V. On trends in health risks from atmospheric pollution and changes in weather and climatic comfort in Russia until 2050. *Meteorology and hydrology*. 2024, 2, 107–119. (In Russian)
13. Anisimov, O.A.; Kokorev, V.A. On the optimal choice of hydrodynamic models for assessing the impact of climate change on the hydrosphere. *Ice and Snow*. 2015, 53(1), 83–92. (In Russian)
14. Katsyka, A.P.; Skripkov, L.V. Climate of Petropavlovsk-Kamchatsky. *Voprosy geografii Kamchatki*. 1965, 3, 11–15. (In Russian)
15. Khen, G.V.; Basyuk, E.O.; Sorokin, Yu.D. Thermal conditions on the surface of the Bering and Okhotsk seas at the beginning of the 21st century against the background of half a century of variability. *Bulletin of TINRO*. 2008, 153, 254–263. (In Russian)
16. National Atlas of Russia: in 4 volumes Vol. 2. Nature. Ecology. Available online: <https://nationalatlas.ru/tom2/146-150.html> (accessed on 15 December 2024). (In Russian)
17. The third assessment report on climate change and its consequences in the territory of the Russian Federation. General summary. Science-intensive technologies: St. Petersburg, Russia, 2022; 124 p. (In Russian)
18. Plan of adaptation to climate change of the Kamchatsky Krai. Available online: <https://minprir.kamgov.ru/document/file/download?id=159212> (accessed on 15 April 2025). (In Russian)
19. CMIP6 Climate Model Repository. Available online: <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cmip6-ipsl/sgd> (accessed on 15 December 2024). (In Russian)
20. Baston, D. exactextractr: Fast extraction from raster datasets using polygons. R package version 0.10.0. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=exactextractr> (accessed on 15 December 2024).
21. FORCES. Constrained aerosol forcing for improved climate projections – GA825205. Final scientific summary report (D9.5) Available online: https://forces-project.eu/wp-content/uploads/2023/02/FORCES_Midterm_Scientific_Report_2022.pdf (accessed on 15 April 2025).
22. Flynn, C.M.; Huusko, L.; Modak, A.; Mauritsen, T. Strong aerosol cooling alone does not explain cold-biased mid-century temperatures in CMIP6 models. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023, 23(23), 15121–15133.
23. DeLessio, M.A.; Tsigaridis, K.; Bauer, S.E. [et al.] Modeling atmospheric brown carbon in the GISS ModelE Earth system model. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024, 24(10), 6275–6304.
24. Rind, D.; Orbe, C.; Jonas, J. [et al.] GISS Model E2.2: A climate model optimized for the middle atmosphere – Model structure, climatology, variability, and climate sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020, 125(10), e2019JD032204.
25. Kuma, P.; Bender, F.A.-M.; Jönsson, A.R. Climate model code genealogy and its relation to climate feedbacks and sensitivity. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2023, 15, e2022MS003588.
26. Knutti, R. The end of model democracy? *Climatic Change*. 2010, 102, 395–404.
27. Knutti, R.; Sedlacek, J.; Sanderson, B.M. [et al.] A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence. *Geophysical Research Letters*. 2017, 44(4), 1909–1918.
28. Khen, G.V.; Ustinova, E.I.; Sorokin, Yu.D. Variability and interrelation of major climate indices for the Northern Pacific: trends, climate shifts, spectra, correlations. *Bulletin of TINRO*. 2019, 199, 163–178. (In Russian)
29. Iizuka, Y.; Uemura, R.; Matsui, H. [et al.] High flux of small sulphate aerosols during the 1970s reconstructed from the SE-Dome ice core in Greenland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022, 127(17), e2022JD036880.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 15.07.2025; принята к публикации 21.07.2025.

The article was submitted 17.04.2025; approved after reviewing 15.07.2025; accepted for publication 21.07.2025.

