

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА ГЛОБАЛЬНЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ

М.А. Тимофеев¹, Н.И. Тананаев²

¹Северо-восточный федеральный университет, Якутск, Россия

²Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. В данной работе показана вариабельность климатических моделей проекта CMIP6. Среднегодовая температура воздуха (СГТВ) – один из основных климатических параметров, по которым оценивается качество воспроизведения моделями наблюдаемого климата. Всего было отобрано 69 моделей. Проанализирован модельный климат для периодов 1961-1990 (базовый) и 1981-2010 (актуальный) гг. В зависимости от средней температуры модели были разделены на три группы: «холодная», средняя, «теплая». Выполнен попиксельный анализ на нормальность, однородность, стационарность критериями Манна-Кендалла, Петтитта, Шапиро-Вилка, Тейла-Сена. 65 из 69 моделей по тесту Манна-Кендалла указывают на наличие монотонного тренда. Только одна модель показала отсутствие роста СГТВ, а все остальные абсолютное указывают на рост СГТВ между рассматриваемыми периодами. В среднем, величина тренда составляет 0.44 °C/10 лет за весь период 1961-2010 гг.

Ключевые слова: климат, Камчатка, среднегодовая температура.

REPRODUCTION OF AVERAGE ANNUAL AIR TEMPERATURE OF THE KAMCHATKA PENINSULA BY GLOBAL CLIMATE MODELS

M.A. Timofeev¹, N.I. Tananaev²

¹North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

²Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Annotation. This abstract shows the variability of the CMIP6 climate models. A total of 69 models were selected. Mean annual air temperature (MAAT) is one of the main climate parameters used to assess the quality of reproduction of observed climate by models. The model climate was analyzed for the periods 1961-1990 (baseline) and 1981-2010 (actual). Depending on the mean temperature, the models were divided into three groups: "cold", "medium", "warm". A pixel-by-pixel analysis was performed for normality, homogeneity, and stationarity using the Mann-Kendall, Pettitt, Shapiro-Wilk, and Theil-Sen criteria. According to the Mann-Kendall test, 65 out of 69 models indicate a monotonic trend. Only one model showed no increase in the mean annual average temperature, while all the others indicate an absolute increase in the mean annual average temperature between the periods under consideration. On average, the trend value is 0.44 °C/10 years for the entire period 1961-2010.

Keywords: climate, Kamchatka, average annual temperature.

Введение. Глобальные климатические изменения имеют выраженное региональное измерение, поскольку проявляются различно в разных регионах планеты [1]. Среднегодовая температура воздуха – один из основных климатических параметров, определенных Всемирной метеорологической организацией [2]. Рост среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) влияет на экосистемы и социально-экономические системы сам по себе [3], и одновременно является косвенным индикатором изменения других климатических переменных: деградации многолетней мерзлоты [4], повторяемости волн жары и роста избыточной смертности [5] и других. Современное распределение СГТВ по территории

устанавливается по данным метеорологических станций и климатических реанализов. Глобальные климатические модели, в свою очередь, остаются единственным инструментом средне- и долгосрочного прогноза климатических переменных, также показавшим свою эффективность в воспроизведении современного глобального климата и его изменений [6]. Воспроизводимость регионального климата моделями вызывает вопросы; не все модели одинаково достоверно воспроизводят климатические условия и их изменения в различных регионах мира [7].

Региональные климатические проекции, концептуально, следует строить на данных мульти-модельного ансамбля, в котором используются данные глобальных моделей, наилучшим образом воспроизводящих региональный климат [8]. Камчатский край – уникальный регион севера Дальнего Востока РФ, климат которого формируется под влиянием сложного рельефа, обширных пространств Мирового океана, между которыми он заключен, долготного простирания и высокой циклонической активности [9]. Наблюдаемые климатические изменения привели к росту СГТВ по данным метеорологических станций в среднем на $+0.2^{\circ}\text{C}$ в декаду, а начиная с 1980-х гг. скорость повышения СГТВ выросла до $+0.37^{\circ}\text{C}$ в декаду [10]. Прогноз климатических изменений необходим для разработки региональных мер адаптации, поскольку значительная часть региональной экономики является климатозависимой (рыбное хозяйство, индустрия туризма). В данной работе проведен сравнительный анализ результатов моделирования климата Камчатки глобальными моделями проекта CMIP6 (Climate Models Intercomparison Project, фаза 6). Приведены результаты расчета СГТВ за климатические периоды (1961-1990 и 1981-2010 гг.), оценка изменений средней по территории СГТВ между данными периодами, а также распределение СГТВ и ее изменений по территории Камчатского полуострова.

Материалы и методы. Сбор данных климатических моделей производился из репозитория CMIP6, задействованы следующие фильтры:

MIP Era: CMIP6; Experiment ID: 'historical'; Variant label: r1ilp1f1, а также другие варианты с альтернативной физикой, например, модель NASA-GISS-E2-1-H с вариантом r1ilp5f1, либо с другими наборами форсинга, как, например, HadGEM3-GC31-MM с вариантом r1ilp1f3; Frequency: mon (среднемесячные значения); Variable: tas приземная температура воздуха. В результате было отобрано 69 моделей. Данные в формате NetCDF. Обработка производилась в среде R Studio, рассчитывались критерии Шапиро-Вилка, Манна-Кендалла, Петтитта и Тейла-Сена.

Для детального анализа по данным базового периода (1961-1990 гг.) климатические модели разделили на группы: холодная, средняя, теплая. Модели в СГТВ в интервале $\mu - 0.675\sigma_p$ и до $\mu + 0.675\sigma_p$ отнесены к средней группе, опорным значением μ служит медианное значение СГТВ по всем моделям в базовом периоде.

Для критериев Шапиро-Вилка, Манна-Кендалла и Петтитта строились растровые покрытия, содержащие для каждого пикселя карты расчетные р-значения критерия, для критерия Тейла-Сена – значения интенсивности тренда, для критерия Петтитта – год, к которому приурочено разрывное нарушение стационарности климатического ряда.

Результаты и их обсуждение. Среднее значение СГТВ на территории Камчатского края по всем 69 климатическим моделям в период 1961-1990 гг. составляет -5.5°C , а медианное значение $\mu = -5.3^{\circ}\text{C}$, при этом стандартное отклонение $\sigma_{1961-1990} = 2.58$. В актуальном периоде 1981-2010 гг. среднее значение СГТВ -4.8°C , а медиана -4.6°C , $\sigma_{1981-2010} = 2.60$.

В нашей работе основные усилия приложены к оценке межмодельного разброса СГТВ. На начальном этапе сбора данных использовались все доступные модели CMIP6, модельный эксперимент *historical*, переменная *tas* (приземная температура воздуха на высоте 2 м). Среднее значение по территории полуострова рассчитывалось по контуру shp-файла административных границ.

В период 1961-1990 гг. все модели воспроизводят среднее по территории Камчатского края значение СГТВ ниже 0°C . Среднее значение СГТВ на территории Камчатского края по всем 69 климатическим моделям в период 1961-1990 гг. составляет -5.5°C . Минимальное

значение СГТВ составило $-14.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (GISS-E2-2-G), максимальное значение $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MIROC-ES2L).

Среднее значение СГТВ на территории Камчатского края в период 1981-2010 гг. составляет $-4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, таким образом, средний рост СГТВ между периодами, зафиксированный климатическими моделями, составил $+0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует трендам по другим регионам Северо-Востока, и в частности, Республике Саха (Якутия), где темпы потепления еще выше. Минимальные и максимальные значения температур, наблюдаются у тех же моделей, что и в более раннем периоде: GISS-E2-2-G, $-13.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, MIROC-ES2L, $+0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Все климатические модели CMIP6, данные которых использованы в работе, показывают повышение СГТВ между климатическими периодами, за исключением единственной модели семейства Earth Consortium (EC-Earth3-AerChem) с альтернативной физикой и модулем атмосферной химии TM5 (<https://ec-earth.org/ec-earth/ec-earth3/>), для которой изменение СГТВ между периодами 1961-1990 и 1981-2010 гг. $\Delta t = 0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальное значение $\Delta t = +1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ показывает также модель семейства Earth Consortium (EC-Earth3); из 69 моделей восемь показывают Δt выше $+1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Среднее значение Δt для всей территории Камчатского края составляет $+0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$, медианное значение $\Delta t = 0.78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Межмодельный разброс по экстремальным значениям превышает $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, от самых холодных моделей семейства GISS-E2 (NASA, США) до самых теплых – семейства MIROC (JAMSTEC, Япония).

Как было сказано выше, модели могут быть условно разделены на «холодные», средние и «теплые». Такое деление характеризует качество воспроизведения современных климатических параметров, но, как известно, абсолютные значения этих параметров в каждый конкретный период воспроизводятся моделями значительно хуже, чем изменение между периодами. Считается, что чем успешнее модель воспроизводит наблюдаемые климатические изменения, для которых известны контролируемые параметры атмосферного форсинга, включая орбитальные параметры и концентрации парниковых газов, тем успешнее она сможет воспроизвести климатическую динамику будущих периодов, управляемую теми же параметрами форсинга.

Одним из основных условий применения статистических методов является нормальность распределения исследуемой выборки. Поэтому в первую очередь, производилась проверка тестом Шапиро-Вилка. На растровых покрытиях среднее рассчитанное значение критерия Шапиро-Вилка, по территории Камчатского края, у всех рассматриваемых климатических моделей намного больше критического уровня 0.05, поэтому гипотеза нормальности рядов не отклоняется. При построении графиков плотности распределения вероятности отмечается их близость к типичной унимодальной колоколообразной форме, хотя могут отмечаться и бимодальные распределения.

Для детального анализа, климатические модели были разбиты на 3 группы: холодная, средняя, теплая. Определение границ интервалов основано на величине среднего стандартного отклонения между двумя периодами, в виде $0.675\sigma_{\text{ср}}$. А опорным значением μ служит медианное значение по всем моделям, в базовом периоде. Таким образом, те модели, чьи средние значения окажутся в интервале от $\mu - 0.675\sigma_{\text{ср}}$ и до $\mu + 0.675\sigma_{\text{ср}}$ будут причислены к средней группе. Те что правее – к теплой, а левее – к холодной. Данный подход выгодно отличается универсальностью, и возможностью применения для любых метеопараметров.

Разбивка на группы, проводится по данным базового периода, при этом возможно и то, что в современном периоде модель покажет другие результаты. В холодную группу вошло 14 моделей, среднюю – 38, и в теплую – 17. Нужно дополнительно отметить, что 69 моделей представлены 27 семьями, но при этом, различия моделей внутри одной семьи могут быть выше, чем между моделями из других семей. Самой многочисленной семьей является NASA-GISS, в которую входит 12 моделей.

Тест Манна-Кендалла – классический непараметрический тренд-тест, основанный на ранговой корреляции. Динамика временного хода групп (Рис. 1) показывает, что средние модели растут быстрее остальных. Фасеточное разделение моделей на стационарные и не

стационарные наглядно демонстрирует, что большинство моделей показывает монотонный тренд. И только 4 модели не имеют тренда, при этом они относятся к разным группам.

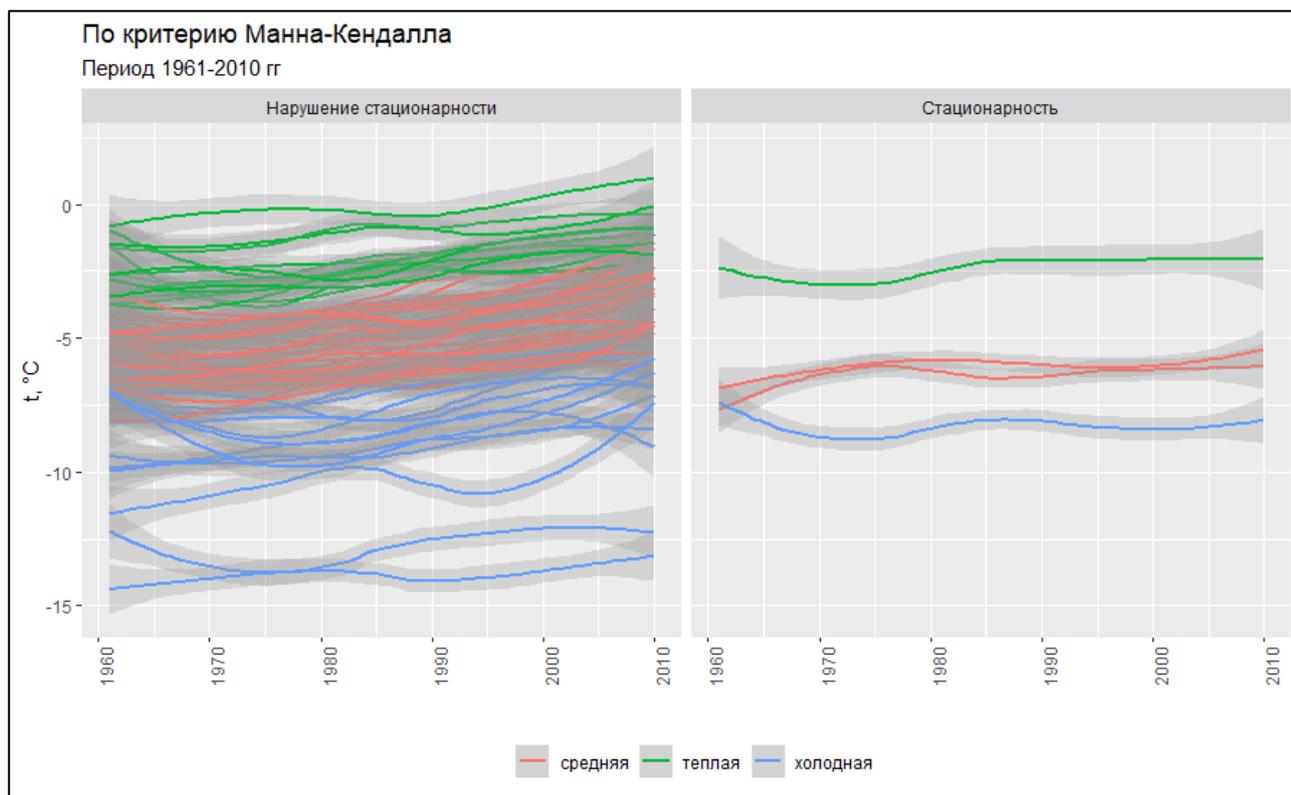


Рис. 1 Различие динамики моделей по критерию Манна-Кендалла

Сильнее всего рост заметен для холодной и средней группы (Рис. 1). Модели, отнесенные к теплой группе, показывают только незначительный рост. Похолодание в период 1970-х сменяется интенсивным ростом СГТВ в последние годы. Из всего пула рассмотренных моделей только 4 показали отсутствие значимого тренда по тесту Манна-Кендалла: CAMS-CSM1-0, EC-Earth3-AerChem (p4), HadGEM3-GC31-MM (f3), ИТМ-ESM. Все они относятся к различным группам и семьям. Если проанализировать у оставшихся моделей пространственное распределение р-значения данного теста, то семь моделей имеют одиночные пиксели со значениями $p > 0.05$ в северной части полуострова. Но при этом на большей части исследуемой территории расчетные значения $p < 0.05$.

Теперь для 65 моделей, что показали наличие тренда рассчитывается интенсивность тренда по критерию Тейла-Сена и точка бифуркации по критерию Петтитта. Интенсивность тренда рассчитывается за весь период 1961-2010 гг, и представляет собой оценку роста температуры за 10 лет.

Тест Петтитта широко используется для выявления разрывных нарушений стационарности, так называемых «степ-трендов» в рядах климатических данных, которые проявляются в резком, немонотонном изменении среднего и медианного значения переменной (при равной либо меняющейся дисперсии), что свидетельствует о резком изменении климатических условий и позволяет определить «поворотную точку» – момент времени, к которому приурочено статистически значимое нарушение стационарности.

В Таблице 1 показаны климатические модели, разбитые по группам, и отсортированные по возрастанию интенсивности тренда. А столбец Δt показывает изменение СГТВ между рассматриваемыми периодами: 1961-1990 гг. и 1981-2010 гг.

Большей интенсивности тренда соответствует большее изменение между периодами, что логично. Наибольшая интенсивность тренда приходится на модель из холодной группы EC-

Earth3, но при этом среднее значение интенсивности тренда выше у средней группы. При делении на группы, различия в форсинге и физике не имеют существенного значения. При этом, у семьи GISS те модели, что в описании океана используют модель GISS Ocean GO1, все отнесены к холодной группе. Это подтверждает мысль, что большую роль в распределении СГТВ на территории Камчатки, по данным климатических моделей, имеет компонента, что отвечает за моделирование океана.

Таблица 1

Климатические модели по группам, и величины их тренда по критерию Тейла-Сена

| Модель | Δt | $\delta t/10$ л. | Год | Модель | Δt | $\delta t/10$ л. | Год |
|--------------------|------------|------------------|------|--------------------|------------|------------------|------|
| <i>Средние:</i> | | | | <i>Теплые:</i> | | | |
| INM-CM4-8 | 0,61 | 0,30 | 1992 | GISS-E2-1-H p5f1 | 0,53 | 0,24 | 1990 |
| BCC-CSM2-MR | 0,33 | 0,30 | 1998 | MIROC6 | 0,38 | 0,28 | 2000 |
| MPI-ESM1-2-HR | 0,50 | 0,30 | 1996 | CNRM-ESM2-1 p1f2 | 0,49 | 0,29 | 1980 |
| AWI-CM-1-1-MR | 0,71 | 0,34 | 1988 | GISS-E2-1-H p3f1 | 0,67 | 0,32 | 1989 |
| BCC-ESM1 | 0,54 | 0,35 | 1996 | GISS-E2-1-H | 0,68 | 0,34 | 1988 |
| CAMS-CSM1-0 p1f2 | 0,68 | 0,35 | 1985 | IPSL-CM6A-LR | 0,69 | 0,35 | 1994 |
| CMCC-CM2-HR4 | 0,78 | 0,36 | 1985 | MIROC-ES2L p1f2 | 0,51 | 0,36 | 1994 |
| ACCESS-CM2 | 0,53 | 0,37 | 1998 | CIESM | 0,77 | 0,38 | 1987 |
| INM-CM5-0 | 0,78 | 0,37 | 1995 | CanESM5-1 p2f1 | 0,86 | 0,41 | 1985 |
| MPI-ESM-1-2-HAM | 0,47 | 0,39 | 1993 | IPSL-CM6A-LR-INCA | 0,83 | 0,44 | 1987 |
| AWI-ESM-1-1-LR | 0,64 | 0,39 | 1994 | MIROC-ES2H p4f2 | 0,84 | 0,44 | 1990 |
| E3SM-2-0 | 0,59 | 0,39 | 1998 | CanESM5-CanOE p2f1 | 0,97 | 0,47 | 1990 |
| FIO-ESM-2-0 | 0,78 | 0,40 | 1986 | CanESM5 p2f1 | 0,97 | 0,47 | 1990 |
| CNRM-CM6-1-HR p1f2 | 0,95 | 0,41 | 1988 | CanESM5-1 | 0,90 | 0,47 | 1987 |
| FGOALS-f3-L | 0,83 | 0,41 | 1993 | CanESM5 | 0,94 | 0,51 | 1983 |
| NorESM2-MM | 0,78 | 0,43 | 1985 | GISS-E2-1-H p1f2 | 0,91 | 0,58 | 1980 |
| CESM2-WACCM-FV2 | 0,86 | 0,44 | 1990 | | | | |
| MPI-ESM1-2-LR | 0,91 | 0,45 | 1987 | | | | |
| GISS-E2-2-H | 1,19 | 0,46 | 1980 | | | | |
| EC-Earth3-Veg | 0,85 | 0,47 | 1990 | | | | |
| NorESM2-LM p4f1 | 0,72 | 0,48 | 1995 | | | | |
| CESM2 | 0,83 | 0,48 | 1988 | | | | |
| CESM2-WACCM | 0,93 | 0,48 | 1985 | <i>Холодные:</i> | | | |
| EC-Earth3-AerChem | 0,72 | 0,48 | 1993 | GISS-E2-2-G p3f1 | 0,41 | 0,24 | 1987 |
| NorESM2-LM | 0,76 | 0,49 | 1984 | GISS-E2-2-G | 0,71 | 0,27 | 1989 |
| ACCESS-ESM1-5 | 0,94 | 0,49 | 1993 | GISS-E2-1-G p3f1 | 0,95 | 0,37 | 1986 |
| KACE-1-0-G | 1,07 | 0,50 | 1990 | GISS-E2-1-G p1f3 | 0,79 | 0,40 | 1992 |
| NESM3 | 0,78 | 0,52 | 1985 | GISS-E2-1-G p1f2 | 0,83 | 0,42 | 1988 |
| EC-Earth3-CC | 0,90 | 0,53 | 1990 | GISS-E2-1-G | 1,07 | 0,42 | 1987 |
| E3SM-1-1 | 0,81 | 0,54 | 1993 | FGOALS-g3 | 0,64 | 0,43 | 1994 |
| E3SM-1-1-ECA | 0,77 | 0,57 | 1994 | EC-Earth3-Veg-LR | 0,86 | 0,44 | 1987 |
| CMCC-ESM2 | 0,95 | 0,57 | 1996 | GISS-E2-1-G p5f1 | 0,86 | 0,46 | 1992 |
| CNRM-CM6-1 p1f2 | 1,34 | 0,58 | 1987 | NorCPM1 | 0,62 | 0,49 | 2000 |
| CESM2-FV2 | 1,25 | 0,58 | 1988 | TaiESM1 | 0,80 | 0,53 | 1994 |
| E3SM-1-0 | 1,11 | 0,61 | 1979 | SAM0-UNICON | 0,67 | 0,56 | 1999 |
| CMCC-CM2-SR5 | 1,28 | 0,63 | 1989 | EC-Earth3 | 1,41 | 0,70 | 1986 |

Выводы.

Произведена оценка межмодельной вариабельности в воспроизведении исторического и современного климата Камчатского края климатическими моделями проекта CMIP6.

Выполнен попиксельный анализ на нормальность, однородность, стационарность критериями Манна-Кендалла, Петтитта, Шапиро-Вилка, Тейла-Сена.

Среднегодовая температура воздуха на территории Камчатского края между периодами 1961-1990 гг. по модельным оценкам увеличилась на $+0.72^{\circ}\text{C}$. Наибольший рост температуры выявлен у средних моделей.

При статистически значимом показателе теста Манна-Кендалла, модели показывают высокие величины линейного тренда, как и предполагалось. В среднем, величина тренда составляет $0.44^{\circ}\text{C}/10$ лет за весь период 1961-2010 гг. При этом средняя интенсивность тренда у разных групп сохраняется на этом уровне. Использовались различные варианты моделей, при этом наибольший разброс значений временного показывали стандартные варианты r1i1p1f1. При этом альтернативные версии внесли свой вклад при расчете среднего по региону.

В конце было указано на то, что существенную роль при формировании температурного режима Камчатки, имеет тот модуль, что заложен в моделях для описания океана. И данная мысль будет исследоваться подробно в последующих работах.

Литература

1. Collins M., Beverley J.D., Bracegirdle T.J. et al. (2024) Emerging signals of climate change from the equator to the poles: new insights into a warming world // *Frontiers in Science* 2, 1340323. <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1340323>
2. Bojinski S., Verstraete M., Peterson T.C. et al. (2014) The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy // *Bulletin of the American Meteorological Society* 95(9), 1431–1443. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00047.1>.
3. Meierrieks D., Stadelmann D. (2024) Is temperature adversely related to economic development? Evidence on the short-run and the long-run links from sub-national data // *Energy Economics* 136, 107758. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107758>.
4. Hu G., Zhao L., Wu T. et al. (2022) Continued warming of the permafrost regions over the Northern Hemisphere under future climate change // *Earth's Future* 10(9), e2022EF002835. <https://doi.org/10.1029/2022EF002835>.
5. Meierrieks D. (2021) Weather shocks, climate change and human health // *World Development* 138, 105228. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105228>.
6. Craigmile P.F., Guttorp P. (2023) Comparing CMIP6 climate model simulations of annual global mean temperatures to a new combined data product // *Earth and Space Science* 10(10), e2022EA002468. <https://doi.org/10.1029/2022EA002468>.
7. Laepple T., Ziegler E., Weitzel N., Hébert R. et al. (2023) Regional but not global temperature variability underestimated by climate models at supradecadal timescales // *Nature Geoscience* 16, 958–966. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01299-9>.
8. Pierce D.W., Barnett T.P., Santer B.D., Glecker P.J. (2009) Selecting global climate models for regional climate change studies // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106(21), 8441–8446. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900094106>.
9. Кондратюк В.И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеиздат, 1974. 204 с.
10. Шкаберда О.А., Василевская Л.Н. Оценка изменений температуры воздуха на Камчатке за последние 60 лет // *Вестник ДВО РАН*. 2013. №3. С. 69–77.