

Оценка применимости глобальных моделей СМIP6 для прогноза изменений климата и повторяемости опасных природных явлений на территории Магаданской области

Н.В. Нестерова, А.Н. Шихов, А.А. Землянскова, П.А. Никитина, О.М. Макарьева

Введение

Регионы севера Сибири и Дальнего Востока играют ключевую роль в будущем экономическом развитии России, так как именно здесь сосредоточены основные минеральные и энергетические ресурсы страны. Суровые климатические условия и распространение многолетней мерзлоты требуют значительных инвестиций для проектирования и эксплуатации инфраструктуры. Увеличение масштабов промышленного освоения арктических территорий приводит к росту нагрузки на окружающую среду. Трансформация окружающей среды в криолитозоне обусловлена как антропогенным воздействием, так и потеплением климата, которое ведет к деградации многолетнемерзлых пород (ММП) и изменению гидрологического режима рек [13, 18].

Поскольку потепление в арктической и субарктической зоне происходит существенно быстрее, чем в более южных регионах, прогноз будущего климата критически важен для разработки стратегии адаптации, включающей минимизацию рисков опасных природных явлений, оказывающих влияние на хозяйственную деятельность человека [18]. Наибольший интерес представляет использование климатических проекций на XXI век для оценки изменений геокриологического и гидрологического режима [20, 32]. Такие оценки используются для решения ряда прикладных задач, в частности для прогнозирования издержек на адаптацию жилищного фонда [16], или для оценки ущерба инфраструктуре [1, 4].

Информационной основой поддержки принятия решений в области адаптации к изменениям климата являются климатические проекции на XXI век, полученные на основе глобальных климатических моделей (ГКМ), которые описывают основные процессы в океане, атмосфере и на поверхности суши. Сравнительные результаты расчетов более чем 50 ГКМ представлены в рамках проектов СМIP-5 (Coupled Model Intercomparison Project-5) и СМIP-6 [24] и имеются в открытом доступе. Оценка применимости ГКМ для того или иного региона основана на использовании результатов так называемых “исторических” экспериментов, в рамках которых модели воспроизводят изменения различных климатических характеристик за период инструментальных наблюдений с середины XIX в. до второго десятилетия XXI века [5]. Результаты этих экспериментов сопоставляются с данными наблюдений или реанализов для определения того, насколько адекватно та или иная модель воспроизводит элементы современного климата. Далее для региональных оценок изменений климата используются методы статистического [25] или

динамического [26] даунскейлинга с целью повышения пространственного разрешения, либо на основе ГКМ создаются региональные ансамбли [33]. Все эти методы улучшают приближение данных ГКМ к данным наблюдений.

В рамках настоящей работы рассматривается качество воспроизведения климатических характеристик в современный период (1981-2010 гг.) на территории Магаданской области на основе данных пяти ГКМ, а также прогноз изменения климата на период 2041-2060 гг.

Магаданская область отличается повсеместным распространением ММП, относится к числу регионов повышенного экономического риска вследствие воздействия опасных гидрометеорологических явлений [39], что подтверждает актуальность и необходимость исследования. Полученные результаты планируется использовать для создания планов адаптации и оценки рисков, связанных с опасными природными явлениями в меняющемся климате.

Регион исследования

Магаданская область находится между $58,80^{\circ}$ и $66,25^{\circ}$ с.ш., $145,50^{\circ}$ и $163,30^{\circ}$ в.д. Южная граница региона проходит по акватории Охотского моря. Рельеф горный, сильно расчленённый, основная часть области занята Колымским нагорьем. Абсолютные высотные отметки достигают 2337 м, средняя высота составляет 491 м. Регион на 99% лежит в области распространения ММП, в континентальной части их распространение сплошное, на побережье – прерывистое и островное. Глубина сезонно-талого слоя меняется от 0,1 до 5 м [22].

Сеть метеорологических наблюдений на территории области представлена 30 метеостанциями Росгидромета, из которых 7 (Магадан, Сусуман, Ола, Брохово, Коркодон, Среднекан, бухта Нагаева) являются реперными. Климат области резко континентальный, продолжительность холодного периода составляет более 200 дней. Среднегодовая температура воздуха на побережье Охотского моря составляет $-2...-3^{\circ}\text{C}$ (Магадан, Ола), в континентальной части области до $-11,5^{\circ}\text{C}$ (Сусуман). Среднемесячная температура воздуха в январе составляет от -15°C на побережье до $-36...-40^{\circ}\text{C}$ в континентальных районах, а абсолютный минимум достигает $-60,6^{\circ}\text{C}$ (Сусуман); в июле от $+11,0^{\circ}\text{C}$ на побережье и до $+15...+16^{\circ}\text{C}$ в континентальных районах, абсолютный максимум $+36,7^{\circ}\text{C}$ (Коркодон). Среднее годовое количество осадков в континентальной части области составляет 250-350 мм, в прибрежной зоне 500-600 мм (1981-2010 гг.). Наибольшее количество осадков выпадает в августе (50-70 мм в континентальных районах и до 100 мм и более на побережье), абсолютный месячный максимум в Магадане составляет 306 мм (в июле 2014 г.). Снежный покров начинает формироваться в сентябре – начале октября, максимум снегонакопления отмечается в марте-апреле. Полный сход снежного покрова наблюдается в мае, в горной части региона – в июне.

Данные и методы

В настоящей работе из 48 ГКМ, представленных в проекте CMIP6, были выбраны пять, которые ранее показали удовлетворительные результаты для территории соседнего региона – Якутии [33]. Это модели CESM2-WACCM [23], CMCC-ESM2 [30], CNRM-CM6-1-HR [36], INM-CM5-0

[37] и MPI-ESM1-2-HR [27], основная информация приведена в табл. 1. По каждой ГKM оценивались следующие климатические характеристики: среднегодовая температура воздуха, температура воздуха в январе и июле, сумма осадков за год, за теплый (апрель-октябрь) и холодный (ноябрь-март) периоды и годовой слой стока. Данные перечисленных моделей были получены с ресурсов Copernicus [21] в формате netCDF, с шагом по времени 1 месяц. Шаг сетки данных составляет от $0,5^\circ$ для модели CNRM-CM6-1-HR до $2,0^\circ$ для модели INM-CM5-0. Для работы были выбраны поля единичной модельной реализации (r1i1p1), а не средние по ансамблю. Архив данных был подготовлен для исторического эксперимента за период 1981-2010 гг., а также на середину XXI века (2041-2060 гг.) для сценария SSP4,5, который предполагает умеренный антропогенный радиационный форсинг (рост на $4,5 \text{ Вт/м}^2$) со стабилизацией во второй половине XXI века. Этот сценарий рассматривается как один из наиболее вероятных [29].

Данные ГKM за период 1981-2010 гг. были сопоставлены со среднемесячными значениями вышеперечисленных климатических характеристик по реанализу ERA5 с шагом сетки $0,25^\circ$ [28], а также с данными наблюдений 14 реперных метеостанций, которые расположены как на территории Магаданской области, так и в соседних регионах. Материалы наблюдений получены из архивов ВНИИГМИ-МЦД [17]. При сопоставлении данных ГKM с данными наблюдений выполнялось извлечение значений из модельной ячейки, в пределах которой расположена каждая метеостанция. Рассчитаны такие метрики точности, как средняя ошибка смещения (Mean Bias Error, MBE) и средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE) при сравнении с данными метеостанций, а также коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена при сопоставлении с данными реанализа. Последние были вычислены на основе сетки с размером ячейки 25 км, поскольку такой размер ячейки примерно соответствует шагу сетки реанализа на исследуемой территории. Уровень значимости α был принят равным 0,05.

Данные прогноза на период 2041-2060 гг. были доступны только для трех из пяти рассматриваемых моделей климата: CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1-HR и INM-CM5-0. Для оценки ожидаемых изменений климатических характеристик рассчитывалась разность между результатами экспериментов и данными реанализа.

Результаты

Оценка точности воспроизведения температуры воздуха за период 1981-2010 гг. по данным ГKM

Сопоставление средней годовой температуры воздуха (СГТВ) на высоте 2 м за период 1981-2010 гг. по данным пяти рассматриваемых ГKM и реанализа ERA5 показывает, что в основном модели завышают СГТВ (рис. 1). Это соответствует результатам, полученным ранее для соседней Якутии, где большинство ГKM из проекта CMIP6 завысило СГТВ в пределах $0,1-3,3^\circ\text{C}$ [33], а также в ряде других работ [2, 8-9].

В основном завышение СГТВ формируется за счет зимнего сезона, когда над континентальной частью региона в долинах рек формируются мощные температурные инверсии, которые в недостаточной степени воспроизводятся моделями, вероятно по причине низкого

пространственного разрешения. В основном температура воздуха завышается на $0,5-2,0^{\circ}\text{C}$, а по моделям INM-CM5-0 и CMCC-ESM2 до $3,0^{\circ}\text{C}$, при этом по последней в континентальной части значения близки к наблюдаемым. Модель CNRM-CM6-1-HR, которая имеет наиболее высокое пространственное разрешение (табл. 1) наоборот занижает СГТВ, местами на $2-3^{\circ}\text{C}$ в северо-западной части области.

Средняя температура воздуха в январе завышена более существенно – в основном на $2-4^{\circ}\text{C}$, а по модели MPI-ESM1-2-HR местами более чем на 5°C . Исключением является модель CNRM-CM6-1-HR, которая занижает температуру воздуха в январе на северо-западе области. По температуре воздуха в июле расхождения между данными моделей климата и реанализа не столь значительны, за исключением модели CESM2-WACCM, которая занижает температуру воздуха в северной части области на $2-3^{\circ}\text{C}$ и более, а также модели INM-CM5-0, которая, наоборот, завышает значения на $1-3^{\circ}\text{C}$ на большей части региона.

Коэффициенты корреляции (R) между данными моделей и реанализа ERA5 для СГТВ превышают 0,7, наиболее сильная корреляция выявлена для модели CNRM-CM6-1-HR (табл. 2). Значения R для температуры воздуха в июле значительно ниже, чем в январе. Это объясняется тем, что летом температурный градиент между прибрежной зоной и континентальными районами области незначительный, в отличие от зимнего периода. Такие условия приводят к снижению качества воспроизведения поля приземной температуры воздуха, особенно моделями с низким пространственным разрешением.

Сравнение с данными метеостанций за 1981-2010 гг. показывает похожие закономерности (табл. 3). Все модели завышают температуру воздуха в зимний период - в январе от $1,8^{\circ}\text{C}$ для модели INM-CM5-0 до $5,3^{\circ}\text{C}$ для модели CESM2-WACCM. Причиной отклонений может быть низкое пространственное разрешение моделей, которое не позволяет воспроизводить приземные температурные инверсии зимой в долинах рек. Для метеостанции Сусуман, где наблюдаются самые низкие температуры зимой, завышение температуры в декабре-январе достигает 8°C по модели CESM2-WACCM.

В теплый период модели, наоборот, занижают температуру воздуха, что также может быть обусловлено расположением многих метеостанций в речных долинах, где значения температуры выше, чем в среднем по модельной ячейке. Наибольшее несоответствие с данными наблюдений получено по модели CESM2-WACCM, по которой занижение в июне составило $4,5^{\circ}\text{C}$. В континентальной части региона отклонения достигают 7°C и более. В годовом ходе самое сильное занижение температуры приходится на май, а по модели CNRM-CM6-1-HR – на апрель (на $2,5-4,0^{\circ}\text{C}$). Таким образом, период максимального несоответствия значений совпадает с периодом весеннего снеготаяния. Аналогичное занижение температуры воздуха над снежным покровом весной характерно не только для моделей климата, но и для моделей численного прогноза погоды [35].

Средняя абсолютная ошибка (MAE) температуры воздуха по всем моделям имеет максимум в зимние месяцы (от $5,0$ до $8,6^{\circ}\text{C}$ в декабре-январе) и минимум в период с августа по октябрь (от $2,0$ до $3,5^{\circ}\text{C}$). Увеличение ошибки зимой обусловлено сильным завышением температуры

воздуха на ряде метеостанций. Вторичный максимум МАЕв июне-июле, в свою очередь, связан с систематическим занижением температуры воздуха, и особенно сильно выражен для модели CESM2-WACCM. В целом за год наибольшую точность обеспечивает модель CNRM-CM6-1-HR (средняя МАЕ 4,0°C), а наибольшие ошибки характерны для моделей с низким пространственным разрешением INM-CM5-0 и CESM2-WACCM (средняя МАЕ 4,8°C и 4,98°C, соответственно). Для сравнения, для территории Якутии наилучшей моделью из рассмотренных в настоящей работе является CMCC-ESM2, средняя ошибка расчета СГТВ по данным которой за период 1981-2010 гг. составила 0,64°C [33]. В работе [1] для арктического региона в целом наиболее эффективные результаты показала модель IPSL-CM5A-MR из проекта CMIP5.

Оценка точности воспроизведения количества осадков и слоя стока за период 1981-2010 гг. по данным ГKM

Сопоставление средней годовой суммы осадков (R_{annual}) за период 1981-2010 гг. по данным ГKM и реанализа ERA5 показывает, что все модели, кроме модели CNRM-CM6-1-HR завышают R_{annual} в 1,1 – 1,5 раза, локально более чем в 1,5 раза (рис. 2). Наибольшее завышение характерно для моделей CMCC-ESM2 и INM-CM5-0. Модель CNRM-CM6-1-HR значительно завышает осадки на прибрежных горных хребтах (в 1,5-2 раза) и занижает в северной части области (на 10-25%, локально на 50%), но в целом по территории региона отклонение от данных реанализа меньше, чем по данным других моделей (рис. 2). При этом основные закономерности пространственного распределения осадков хорошо воспроизводятся всеми моделями, на что указывают высокие значения коэффициентов корреляции (свыше 0,8), вне зависимости от пространственного разрешения моделей.

Выявленное завышение осадков по данным ГKM подтверждается и при сравнении с данными сети метеостанций. Величина МВЕ изменяется синхронно годовому ходу осадков – увеличивается в летние месяцы и уменьшается зимой, за исключением модели INM-CM5-0, которая сильнее завышает зимние осадки, чем летние. Величина МАЕ для среднемесячных сумм осадков по модели высокого разрешения CNRM-CM6-1-HR существенно меньше, чем по всем остальным моделям.

Средний годовой слой стока по данным ГKM существенно отличается от аналогичной величины по данным реанализа ERA5. В центральной и северной части области слой стока по моделям климата значительно (в три раза и более) превышает слой стока по данным ERA5, также есть существенные расхождения и на юго-востоке области. Исключением является модель высокого разрешения CNRM-CM6-1-HR, согласно которой слой стока на рассматриваемой территории меньше, чем по данным реанализа всего на 5-10%. Пространственная корреляция с данными ERA5 для годового слоя стока также максимальная по этой модели. Таким образом, данные модели CNRM-CM6-1-HR лучше всего соответствуют данным реанализа и наблюдений по количеству осадков, а также данным реанализа ERA5 по годовому слою стока. В то же время важно отметить, что в северо-восточной части области годовой слой стока по данным ERA5 составляет всего 50-100 мм, что в 2-4 раза меньше, чем по данным наблюдений.

Ожидаемые изменения климатических характеристик на территории Магаданской области по данным ГKM на период 2041-2060 г. согласно сценарию SSP4,5

Прогностические данные по сценарию SSP4,5 доступны только для трех рассматриваемых ГKM: CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1-HR и INM-CM5-0. Согласно данным всех трех моделей, прогнозируется рост СГТВ на 3,0-3,8°C по модели CMCC-ESM2 и в пределах 1,5-2,5°C по данным двух других моделей. Выраженные пространственные закономерности роста СГТВ не наблюдаются. Более значительное потепление прогнозируется в зимний период, однако между моделями есть существенные различия. Так, по модели CMCC-ESM2 ожидается рост температуры воздуха в январе на 5,0°C и более, по модели CNRM-CM6-1-HR потепление в пределах от 0,8°C на востоке области до 2,5-3,0°C на севере, а по модели INM-CM5-0 потепление в пределах от 3,0°C до 4,5°C. В июле также ожидается рост температуры воздуха – на 2,0-2,5°C по модели INM-CM5-0, и на 4°C и более по модели CMCC-ESM2.

На период 2041-2060 гг. по данным всех рассмотренных ГKM прогнозируется увеличение количества осадков – как в целом за год, так и в теплый и холодный сезоны, в сравнении с периодом 1981-2010 гг. (рис. 3). По модели CNRM-CM6-1-HR в горной части региона рост может составить 25-30% и более. Более значительный рост количества осадков ожидается в холодный период года по данным всех рассматриваемых моделей в северной части региона, при этом в прибрежной зоне прогнозируется даже некоторое уменьшение осадков. Похожее распределение сохраняется и в теплый период – наиболее существенное увеличение количества осадков (на 30% и более) прогнозируется по модели CNRM-CM6-1-HR на севере региона. В прибрежной зоне прогнозируется более слабый рост, или даже уменьшение количества осадков в теплый период (по модели CMCC-ESM2).

Согласно данным моделей CMCC-ESM2 и CNRM-CM6-1-HR, в период 2041-2060 гг. ожидается значительное увеличение годового слоя стока – на севере региона на 30% и более, на локальных участках в два раза. При этом в южной части региона ожидается увеличение слоя стока в пределах 30% (по модели CNRM-CM6-1-HR – не более чем на 20%). По модели INM-CM5-0 ожидается увеличение слоя стока не более чем на 10-20%. Тенденция увеличения годового слоя стока отмечается уже в настоящее время по данным наблюдений.

Обсуждение

В ряде ранее опубликованных работ также рассматривалось ожидаемое изменение климата на территории Магаданской области. Так, в работах [8-9] на основе моделей проекта CMIP5 прогнозировался рост температуры воздуха на 2,6-5,6°C в 2041–2060 гг. относительно нормы 1961–1990 гг. Так же, как и по данным рассмотренных моделей CMIP6, наиболее сильное потепление ожидалось в зимний период. В граничащих с Магаданской областью регионах к середине XXI века прогнозировалось повышение СГТВ не более чем на 5,0°C [1, 9]. Таким образом, представленные оценки роста температуры воздуха несколько ниже ранее опубликованных.

Также в работе [9] на основе ансамбля из 8 моделей проекта CMIP5 прогнозировался рост количества осадков в Магаданской области в 2035-2064 гг. на 10-30 мм относительно нормы

1961-1990 гг., в основном за счет летнего и осеннего сезона. Этот прогноз соответствует наблюдаемым трендам, поскольку количество осадков уже растет на 5-10% за 10 лет [6]. По данным моделей, рассмотренных в настоящей работе, значительный рост количества осадков ожидается в холодный период в горных районах, а в некоторых районах области возможно и сокращение осадков как в теплый, так и в холодный периоды года.

Следствием наблюдаемого потепления зим и переходных сезонов может быть сокращение числа дней со снежным покровом. В результате возможно внутригодовое перераспределение стока рек – рост зимнего стока и сокращение весеннего стока. По данным наблюдений в северных широтах уже прослеживается увеличение зимнего стока рек на 60-90 %, а летнего — от 5 до 40 % [19]. Незначимое увеличение среднегодового стока рек отмечают в Якутии [11]. В работе [33] выявлены значимые тренды увеличения среднесуточного и максимального расходов воды рек водосбора р. Лены на историческом периоде данных (с 1925 по 2013 гг.).

В Магаданской области сведения о гидрологическом режиме рек с малым водосбором (<200 км²), которые наиболее чувствительны к изменению количества осадков ограничены, что затрудняет анализ влияния изменения климата на их сток. По данным сценарных прогнозов для р. Колымы возможно значительное увеличение нормы годового стока [3]. Относительно периода 1979-1999 гг., сток р. Колымы уже увеличился на 5,7% [10]. Рост количества осадков на 10% может привести к увеличению годового стока на 19%, что может сопровождаться увеличением опасности паводков [10]. По данным [6], в целом на территории Дальневосточного федерального округа (ДФО) рост повторяемости паводков подтверждается по данным наблюдений.

Помимо паводков, потепление климата может существенно повлиять на формирование ледостава на реках и образование наледей. По данным спутниковых наблюдений [14], площади гигантских наледей за последние десятилетия не имеют очевидного тренда (для одних наледей характерно сокращение площади, для других оно не наблюдается). Однако наблюдаемое увеличение речного стока, в частности в сентябре [12] и ожидаемое дальнейшее увеличение количества осадков и стока могут препятствовать снижению наледности. Также вследствие потепления наблюдается сокращение периода ледостава крупных рек [6-7] и изменение максимальной толщины речного льда [7, 19], что создает сложности в снабжении труднодоступных населенных пунктов по автозимникам, которые традиционно прокладывают по речной сети.

Более значительное потепление в будущем также приведет к деградации ММП и увеличению глубины протаивания. В настоящее время мощность сезонно-талого слоя в среднем увеличивается на 3 см/год, а температура пород повышается на 0,5°C/10 лет [6]. Если среднегодовая температура повысится на 2,0°C, то несущая способность свайных фундаментов снизится на 50%, и ущерб для жилищного фонда всей территории распространения ММП (включая и Магаданскую область) к середине XXI века может составить 700 млрд. руб. [15].

Наблюдаемые и прогнозируемые изменения климата подтверждают, что в будущем в Магаданской области можно ожидать существенный экономический ущерб вследствие потепления и вызванных им изменений природных условий. Актуальными проблемами остаются редкая сеть наблюдений и отсутствие нормативных документов по адаптации к изменениям климата. В

настоящее время при грантовой поддержке в регионе создана и развивается комплексная сеть наблюдений за ключевыми параметрами климата, гидрологического режима и состояния ММП [31], которая частично позволяет решить проблему дефицита данных.

Заключение

В рамках настоящей работы оценивалось качество воспроизведения среднегодовой температуры воздуха, температуры воздуха в январе и июле, суммы осадков за год, за теплый (апрель-октябрь) и холодный (ноябрь-март) периоды по данным пяти ГКМ из проекта CMIP6 для территории Магаданской области. Модели были выбраны на основании ранее опубликованных результатов по соседнему региону (Якутии).

Сопоставление результатов исторических экспериментов с ГКМ (за период 1981-2010 гг.) с данными реанализа ERA5, а также наземных наблюдений за показало, что модели в основном завышают температуру воздуха, особенно в зимний период, в теплый период, наоборот, наблюдается систематическое занижение. Модели недооценивают внутригодовую изменчивость температуры воздуха вследствие их низкого пространственного разрешения, сложного рельефа территории, а также расположения многих метеостанций в долинах рек (где зимой холоднее, а летом наоборот теплее, чем в среднем по окружающей территории). Также ГКМ существенно завышают осадки, наибольшее завышение характерно для моделей с низким пространственным разрешением. В целом установлено, что модель с наиболее высоким разрешением CNRM-CM6-1-HR лучше всего воспроизводят климатические характеристики.

Оценка будущих изменений температуры воздуха и осадков была проведена на основе трех ГКМ: CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1-HR и INM-CM5-0. Согласно данным моделей, к 2041-2060 гг. средняя годовая температура воздуха повысится на 1,5-3,8°C, причем в зимний период потепление будет сильнее. Количество осадков увеличится в пределах 30%, более значительный рост ожидается в горной части региона. Такие изменения могут способствовать увеличению годового стока рек на 10-30%, а на отдельных участках и более. Полученные данные в перспективе будут использованы для разработки планов адаптации региона к негативным последствиям изменения климата, наиболее значимыми из которых являются деградация ММП и рост повторяемости дождевых паводков.

Исследование выполнено при поддержке СПбГУ в рамках проекта «Разработка методики оперативного прогноза опасных гидрометеорологических явлений в условиях Дальневосточного федерального округа (на примере Магаданской области)» ID PURE 131127765.

Список цитируемой литературы

1. **Анисимов О.А., Бадина С.В.** Оптимизация региональных планов адаптации к изменению климата в Арктической зоне России на основе прогностического моделирования. — Арктика: экология и экономика, 2024, Т. 14(3), с. 350—359.
2. **Анисимов О.А., Кокорев В.А.** Климат в арктической зоне России: анализ современных изменений и модельные проекции на XXI век. — Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2016, № 1 с. 61—70.
3. **Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В. и др.** Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз. — Фундаментальная и прикладная климатология, 2021, Т. 7, № 1, С. 36—79.
4. **Гребенец И., Кизяков А. И., Маслаков А.А. и др.** Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике. — Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2022, № 2, с. 25—36.
5. **Добровольский С.Г., Юшков В.П., Соломонова И.В.** Изменения глобального водообмена по результатам исторических экспериментов на климатических моделях проекта CMIP-6. — Водные ресурсы, 2023, Т. 50, № 6, с. 751—766.
6. **Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год.** — М., 2024. 104 с.
7. **Землянкова А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М.** Изменение ледового режима рек Северо-Востока России. — Арктика и Антарктика, 2024, № 1. с. 20— 33.
8. **Кокорев В.А., Анисимов О.А.** Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России. — Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем, 2013, Т. 25, с. 131—153.
9. **Кокорев В.А., Шерстюков А.Б.** О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России. — Арктика XXI век. Естественные науки, 2015, № 2(3), с. 5—23.
10. **Лисина А.А., Сазонов А.А., Фролова Н.Л. и др.** Чувствительность водного стока реки Колымы к современным климатическим изменениям. — Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2024, № 3, С. 108—122.
11. **Лобанов В.А., Кириллина К.С.** Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). СПб., РГГМУ, 2019, 157 с.
12. **Макарьева О.М., Нестерова Н.В.** Фазовое состояние осадков как фактор увеличения меженного стока в криолитозоне (на примере бассейнов Яны и Индигирки). — Метеорология и гидрология, 2020, № 4, с. 95 — 103.
13. **Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Бельдиман И.Н., Лебедева Л.С.** Актуальные проблемы гидрологических расчетов в арктической зоне Российской Федерации и сопредельных территориях распространения многолетней мерзлоты. — Проблемы Арктики и Антарктики, 2018, Т. 64(1), с. 101—118.
14. **Макарьева О.М., Шихов А.Н., Землянкова А.А. и др.** Гигантские наледи-тарыны северо-востока России по данным кадастра (1958 г.) и космическим снимкам 1973-2021 гг. — Криосфера Земли, 2023, Т. XXVII, № 6, с. 27—39.
15. **Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др.** Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века. — Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2021, № 1, с. 14—31.
16. **Порфирьев Б.Н.** Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты для жилищного сектора российской Арктики. — Вестник Российской академии наук, 2021, Т. 91(2), с. 105—114.

17. **Специализированные массивы данных для климатических исследований.** [Электронный ресурс], [сайт]: URL: <http://aisori-m.meteo.ru> (дата обращения: 15.01.2025).
18. **Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме.** — СПб.: Научно-технологические исследования, 2022. 124 с.
19. **Цыбиков Н.А.** Влияние глобальных изменений климата на обеспечение безопасности при реализации крупных экономических и инфраструктурных проектов в Арктике. — Обеспечение безопасности при реализации крупных экономических и инфраструктурных проектов в Арктике. Проблемы и пути решения, 2016, с. 107—122.
20. **Burke E.J., Zhang Y., Krinner G.** Evaluating permafrost physics in the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) models and their sensitivity to climate change. — *The Cryosphere*, 2020, vol. 14, pp. 3155–3174.
21. **Climate Data Store** [Электронный ресурс], [сайт]: URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (дата обращения: 15.01.2025).
22. **Cordex Experiment** [Электронный ресурс], [сайт]: URL: <https://cordex.org> (дата обращения: 15.01.2025).
23. **Danabasoglu G., Lamarque J.-F., Bacmeister J. et al.** The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). — *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2020, vol. 12, Art. No. e2019MS001916.
24. **Eyring V., Bony S., Meehl G.A. et al.** Overview of the coupled model Intercomparison project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. — *Geosci. Model Dev.*, 2016, Vol. 9, pp. 1937—1958.
25. **Fick S.E., Hijmans R.J.** WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. — *Int. J. Climatol.*, 2017, vol. 37, pp. 4302—4315.
26. **Giorgi F.** Thirty years of regional climate modeling: where we are and where we are going next? — *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 2019, Vol. 124, pp. 5696—5723.
27. **Gutjahr O., Putrasahan D., Lohmann K. et al.** Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). — *Geosci. Model Dev.*, 2019, vol. 12., pp. 3241—3281.
28. **Hersbach H. et al.** The ERA5 global reanalysis. — *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999—2049.
29. **IPCC, 2023: Summary for Policymakers.** In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1—34.
30. **Lovato T., Peano D., Butenschön M. et al.** CMIP6 simulations with the CMCC Earth System Model (CMCC-ESM2). — *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2022, vol. 14, Art. No. e2021MS002814.
31. **Makarieva O., Zemlianskova A., Abramov D. et al.** Geocryological Conditions of Small Mountain Catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia). — *Geosciences*, 2024, vol. 14(4), Art. No. 88.
32. **Steinert N.J., Debolskiy M.V., Burke E.J. et al.** Evaluating permafrost definitions for global permafrost area estimates in CMIP6 climate models. — *Environ. Res. Lett.*, 2024, vol. 19, Art. No. 014033.
33. **Tananaev N.I.** Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia. — *Polar Sci.*, 2024, vol. 41, Art. No. 101066.
34. **Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S.** Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. — *Geophys. Res. Lett.*, 2016, T. 43, № 20, с. 764—772.
35. **Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M. et al.** Numerical weather forecasts at kilometer scale in the French Alps: Evaluation and application for snowpack modeling. — *J. Hydrometeorol.*, 2016, vol. 17, pp. 2591–2614.
36. **Voltaire A., Saint-Martin D., Sénési S. et al.** Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1. — *J. Advances in Model. Earth Syst.*, 2019, vol. 11, pp. 2177—2213.

37. **Volodin E.M.** Possible Climate Change in Russia in the 21st Century Based on the INM-CM5-0 Climate Model. — Russ. Meteorol. Hydrol., 2022, vol. 47, pp. 327—333.
38. **World Data Center for Climate** [Электронный ресурс], [сайт]: URL: <https://www.wdc-climate.de/ui> (дата обращения: 15.01.2025).
39. **Zemtsov S.P., Baburin V.L., Koltermann K.P. et al.** Social risk and vulnerability assessment of hazardous hydrological phenomena in Russia. — Geography, environment, sustainability, 2014, vol. 7(4), P. 95—117.

Таблицы

Таблица 1

Основные характеристики рассмотренных ГКМ из проекта CMIP6 [38]

Название модели	Шаг сетки по горизонтали, °	Размер матрицы	Число вертикальных уровней	Разработчик и год разработки
CESM2-WACCM	0.9×1.25	288×192	70	Национальный центр атмосферных исследований США (NCAR), 2018
CMCC-ESM2	1×1	288×192	30	Европейско-Средиземноморский центр по изменению климата, Италия (2017)
CNRM-CM6-1-HR	T359 (≈0.25×0.25)	1442×1050	91	Национальный центр метеорологических исследований, Франция (2017)
INM-CM5-0	2×1.5	180×120	73	Институт вычислительной математики РАН, Россия (2016)
MPI-ESM1-2-HR	T127 (≈0.9×0.9)	384×192	95	Институт метеорологии Макса Планка, Германия (2017)

Таблица 2

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (числитель) и линейной корреляции Пирсона (знаменатель) между значениями климатических переменных по данным ГКМ (исторический эксперимент, период 1981-2020 гг.) и реанализа ERA5. Все корреляции статистически значимы при $\alpha=0,05$

Переменная	CESM2-WACCM	CMCC-ESM2	CNRM-CM6-1-HR	INM-CM5-0	MPI-ESM1-2-HR
Среднегодовая температура воздуха	0,79/0,89	0,76/0,90	0,89/0,95	0,70/0,82	0,85/0,91
Средняя температура января	0,91/0,94	0,92/0,94	0,87/0,93	0,88/0,84	0,87/0,92
Средняя температура июля	0,28/0,25	0,56/0,58	0,67/0,78	0,48/0,43	0,83/0,84
Годовая сумма осадков	0,91/0,89	0,80/0,82	0,88/0,87	0,84/0,83	0,88/0,86
Среднегодовой речной сток	0,79/0,79	0,68/0,71	0,91/0,90	0,68/0,70	0,82/0,81

Таблица 3

Средняя ошибка смещения (МВЕ) и средняя абсолютная ошибка (МАО) для температуры воздуха по месяцам года (среднее за 1981-2010 гг.) по данным ГКМ в сравнении с данными реперных метеостанций Росгидромета.

ГКМ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	Средняя ошибка смещения (МВЕ)											
CESM2-WACCM	4.4	2.5	0.5	-0.4	4.1	4.5	-3.7	2.0	0.3	2.9	4.9	4.9
CMCC-ESM2	4.3	1.6	0.1	0.0	-2.8	-1.7	-1.9	0.9	0.3	0.6	2.3	4.2
CNRM-CM6-1-HR	2.3	1.0	-0.8	-2.5	-0.8	0.5	0.5	1.4	0.7	1.8	1.4	2.3
INM-CM5-0	5.4	3.3	1.1	-0.4	-2.5	0.0	-1.1	1.1	-1.4	-0.6	2.0	3.7
MPI-ESM1-2-HR	1.8	1.4	1.7	0.1	3.7	-2.4	-0.1	0.9	1.0	0.4	0.3	1.6
	Средняя абсолютная ошибка (МАО)											
CESM2-WACCM	6.7	6.0	3.8	3.0	4.5	4.8	4.6	3.6	2.4	3.6	6.8	7.8
CMCC-ESM2	6.4	5.2	3.9	3.1	3.7	3.1	3.4	3.0	2.4	3.4	5.7	7.0
CNRM-CM6-1-HR	5.3	5.2	4.4	3.9	2.7	2.8	3.0	3.0	2.6	3.4	5.1	6.8
INM-CM5-0	7.8	7.5	5.7	3.6	4.2	3.4	2.8	2.6	2.6	4.1	6.9	8.6
MPI-ESM1-2-HR	7.3	6.1	4.6	3.1	3.6	2.4	2.9	2.9	3.2	3.1	5.0	7.2

Подписи к рисункам

Рис. 1. Разность СГТВ за 1981-2010 гг. по данным ГКМ (исторический эксперимент) и реанализа ERA5: а) – CESM2-WACCM; б) – CMCC-ESM2; в) – CNRM-CM6-1-HR; г) – INM-CM5-0; д) – MPI-ESM1-2-HR.

Рис. 2. Разность R_{annual} за 1981-2010 гг. по данным ГКМ (исторический эксперимент) и реанализа ERA5: а) – CESM2-WACCM; б) – CMCC-ESM2; в) – CNRM-CM6-1-HR; г) – INM-CM5-0; д) – MPI-ESM1-2-HR -ESM1-2-HR.

Рис. 3. Ожидаемые изменения годовой суммы осадков в период 2041-2060 гг. в сравнении с периодом 1981-2010 гг. по данным ГКМ: а) – CMCC-ESM2; б) – CNRM-CM6-1-HR; в) – INM-CM5-0.

Оценка применимости глобальных моделей СМIP6 для прогноза изменений климата и повторяемости опасных природных явлений на территории Магаданской области

Нестерова Н.В. *, Шихов А.Н. **, Землянскова А.А. *, Никитина П.А. *, Макарьева О.М. *

* Санкт-Петербургский государственный университет

** Пермский государственный национальный исследовательский университет

Для территории Магаданской области проанализированы результаты исторических экспериментов с пятью глобальными моделями климата (ГКМ) из проекта СМIP6 за период 1981-2010 гг. Рассмотрено качество воспроизведения моделями температуры воздуха, осадков и годового слоя стока, путем сопоставления выходных данных ГКМ с данными наземных наблюдений и реанализа ERA5. Установлено, что все ГКМ недооценивают внутригодовую амплитуду колебаний температуры воздуха, завышая температуру зимой и занижая ее летом, особенно в континентальных районах. Большинство ГКМ завышает количество осадков в пределах 30%, более существенно в холодный период, а также завышают величину стока. В целом наилучшая сходимость результатов получена по модели CNRM-CM6-1-HR. Согласно данным ГКМ, при реализации «умеренного» сценария потепления SSP 4,5, к 2041-2060 гг. средняя годовая температура воздуха повысится на 1,5-3,8°C, причем в зимний период потепление будет сильнее, количество осадков увеличится в пределах 30%, более значительный рост ожидается в горной части региона. Такие изменения могут способствовать увеличению годового стока рек на 10-30%.

Ключевые слова: Магаданская область, изменения климата, глобальные модели климата, СМIP6, температура воздуха, осадки, речной сток, опасные природные явления

Assessment of applicability of CMIP6 global climate models for predicting climate change and the frequency of natural hazards in the Magadan region

Nesterova N.V. *, Shikhov A.N. **, Zemlianskova A.A. *, Nikitina P.A. *, Makarieva O.M. *

* Saint Petersburg State University

** Perm State University

The results of historical experiments with five global climate models (GCMs) from the CMIP6 project for the period 1981-2010 are analyzed for the territory of the Magadan region. The performance of the GCMs in simulating air temperature, precipitation and annual runoff is considered by comparing the output data of the GCMs with ground-based observations and ERA5 reanalysis data. It is found that all GCMs underestimate the annual range of air temperature variability, overestimating air temperature in winter and underestimating it in summer, especially in the continental part of the regions. Most GCMs overestimate precipitation by up to 30%, more in the cold season, and also overestimate annual runoff. In general, the high-resolution GCM model CNRM-CM6-1-HR has the best performance in simulating air temperature and precipitation. According to the GCM data for 2041-2060, under the 'moderate' warming scenario SSP4.5, the average annual air temperature will increase by 1.5-3.8°C (with more warming in winter) and precipitation will increase by 30% (with more significant increases in the mountainous part of the region). Such changes could contribute to a 10-30% increase in annual river runoff.

Key Words: Magadan region, climate change, global climate models, CMIP6, air temperature, precipitation, river runoff, natural hazards

Сведения об авторах

Нестерова Наталия Вадимовна, кандидат технических наук, научный сотрудник Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ).

Служебный адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

Тел. +7 981 885 7587

E-mail: nnesterova1994@gmail.com

Шихов Андрей Николаевич, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ).

доцент кафедры картографии и геоинформатики Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ).

Служебный адрес: 614990 г. Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15, ПГНИУ, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики.

Тел. +7(951)9370063.

E-mail: and3131@inbox.ru

Землянскова Анастасия Александровна, кандидат технических наук, научный сотрудник Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ).

Служебный адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

Тел. + 7(908)2272824

E-mail: anastasiazemlanskova@gmail.com

Макарьева Ольга Михайловна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ).

Служебный адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

Тел. + 7(911)2132657

E-mail: omakarieva@yandex.ru

Никитина Полина Андреевна, лаборант–исследователь Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ).

Служебный адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

Тел. +7 911 251 3186

E-mail: PolinaNikitina25@yandex.ru