

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-125-138.31>

УДК 551.583
МРНТИ 39.23.15

С. А. Долгих^{*1}, Е. Е. Белдеубаев², Г. Е. Турумова³

^{1*} Ведущий научный сотрудник, к. г. н.

(Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан; Svetlana_Dolgikh@mail.ru)

² Ведущий научный сотрудник, докторант КазНУ им. аль-Фараби (Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан; yerke_beldeubayev@mail.ru)

³ Ведущий инженер, магистр естественных наук (Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан; turumova94@mail.ru)

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В РЕЖИМЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В БАССЕЙНЕ РЕКИ АМУДАРИЯ ПО ДАННЫМ МОДЕЛЕЙ СМIP6 К СЕРЕДИНЕ ТЕКУЩЕГО СТОЛЕТИЯ

Аннотация. Рассмотрены вероятные изменения в характеристиках режима температуры на территории бассейна р. Амудария к середине XXI века. Оценка изменений получена на основе результатов мульти-модельных ансамблей сопряженных моделей глобального климата, участвовавших в шестом этапе проекта взаимного сравнения сопряженных моделей (СМIP6) при двух комбинированных сценариях социально-экономического пути глобального развития и репрезентативных путей концентрации (SSP2-4.5 и SSP5-8.5). Результаты указывают, что на территории бассейна ожидается продолжение тенденции потепления во все сезоны года. К середине столетия вероятные изменения сезонных температур по всей территории укладываются в диапазон: 1,8-3,6 °C для зимних; 1,8-3,1 °C для весенних; 2,2-3,4 °C для летних и 2,1-3,4 °C для осенних температур. Средние годовые температуры могут повыситься на 2,1-3,2 °C. Ожидается увеличение значений абсолютного максимума и минимума суточной температуры воздуха, рост повторяемости экстремально высоких температур воздуха (выше 35 и 40 °C) и уменьшение повторяемости дней с температурами ниже 0 °C. Дано пространственное распределение изменений в характеристиках режима температуры по территории бассейна, которое демонстрирует схожие закономерности для двух сценариев с более сильными изменениями в соответствии со сценарием SSP5-8,5.

Ключевые слова: изменение климата, режим температуры, сценарии климата, модели глобального климата, СМIP6.

Введение. Река Амудария, одна из крупнейших в Центральной Азии, берет начало в горах Памира и Гиндукуша и впадает в Аральское море. Ее бассейн простирается на территории пяти государств: Кыргызстана, Таджикистана, Узбекистана, Туркменистана и частично Афганистана. Горные хребты Гиндукуш, Сарыкольский, Алайский, Туркестанский и Нуратау образуют естественные границы водосбора. Ниже горных районов речная долина расширяется, переходя в обширные равнины, покрытые песчаными пустынями Каракум и Кызылкум.

Изолированность от океанов обусловила формирование в бассейне континентального климата, характеризующегося жарким летом, холодной зимой и малым количеством осадков. Наиболее ярко это проявляется в дельте Зеравшана и низовьях Амударьи, где годовое количество осадков колеблется от 100 до 220 мм [1]. Климат региона в целом теплый и сухой. Среднегодовая температура колеблется от +14 до +17 °C, но в низовьях Амударьи она ниже – от +11 до +14 °C. Лето жаркое (до +32 °C), зима мягкая (от +1 до +2 °C), за исключением низовьев, где зимой возможны заморозки до минус 6 °C. Годовое количество осадков невелико, но в межгорных долинах достигает 450-700 мм при более теплом климате.

Изменение климата несет в себе как риски, так и возможности. Однако существующая экономика, адаптированная под прошлые климатические условия, делает негативные последствия более вероятными, особенно в засушливых регионах. Увеличение числа и интенсивности экстремальных погодных явлений, таких, как волны жары, и изменения в гидрологическом цикле являются основными угрозами. Для адаптации к новым условиям необходимо оценить будущие климатические изменения.

Глобальное потепление демонстрирует устойчивую тенденцию к росту, что подтверждается новыми данными. Согласно Всемирной метеорологической организации [2], глобальная средняя годовая температура в 2023 году была на $1,45 \pm 0,12$ °C выше значений доиндустриального периода 1850-1900 гг. Это был самый теплый год за всю историю наблюдений. Начиная с 1980-х годов наблюдается устойчивая тенденция к потеплению климата, причем каждое последующее десятилетие превышает по температуре все предыдущие с 1850 года. Средняя глобальная температура за последнее десятилетие 2014-2023 годы превысила на $1,20 \pm 0,12$ °C среднюю температуру за доиндустриальный период 1850-1900 гг.

В докладе ВМО, подготовленном Ведущим центром годового/десятилетнего прогнозирования климата, представлен синтез прогнозов на 2024-2028 годы [3]. Согласно докладу с высокой вероятностью в течение одного из следующих пяти лет среднегодовая глобальная температура временно превысит на $1,5$ °C доиндустриальный уровень. Также вероятно (86%), по крайней мере в один из этих лет, будет установлен новый температурный рекорд, который побьет 2023 год.

Наблюдаемые эффекты глобального потепления, когда изменение климата является основным фактором, также влияют на экстремальные тепловые явления, частота, величина, продолжительность и измеряемые температуры которых увеличиваются. При этом большинство регионов суши, безусловно, будут затронуты в будущем [4, 5]. При температуре 40 °C и влажности 25% скорость метаболизма человека увеличивается в среднем на 35 % по сравнению с исходным уровнем, но температура тела не повышается, то есть порог температуры в 40 °C является пределом температурной адаптации. Это верхняя граница так называемой термонейтральной зоны – диапазона температур, при которых организм человека тратит минимальное количество энергии в состоянии покоя [6]. Исследования показали, что максимальная температура, которую может выдержать человеческое тело, составляет 42,3 °C. Если человек подвергается воздействию тепла в течение некоторого времени, это может нанести непоправимый вред мозгу.

Многие характеристики изменения климата напрямую зависят от уровня глобального потепления. Темпы потепления климата не одинаковы по территории земного шара. Например, в Шестом оценочном докладе (ОД6) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) представлено, что потепление над сушей больше, чем в среднем по миру, а в Арктике оно более чем в два раза выше [5]. Континентальность климата в бассейне Амударии усиливает эффект глобального потепления, приводя к более высоким темпам нагрева. Например, в Таджикистане, где более 93 % территории страны занимают горные территории, более половины гор находятся на высоте 3000 м над ур. м. и выше. Данные за 1940-2020 гг. показывают, что средняя годовая температура здесь повышалась на $0,3-0,5$ °C каждое десятилетие, в альпийской зоне – на $0,2-0,4$ °C [7]. В весенний период скорость роста достигала $1,3$ °C/10 лет. На равнинной территории Таджикистана среднегодовая температура увеличивалась на $0,1-0,2$ °C за десятилетие с наибольшим ростом температуры на $0,5-0,8$ °C. В Узбекистане по данным практически всех метеорологических станций повышение средних годовых температур приземного воздуха статистически значимое и превысило естественную изменчивость [8]. За период с 1925 по 2013 год среднегодовая температура в северной, центральной и южной частях Узбекистана увеличилась на 1,69; 1,63 и 1,72 °C соответственно, что значительно превышает темпы глобального потепления. В Туркменистане средняя температура повышалась на $0,3$ °C за каждое десятилетие с 1950 по 2010 год [9]. Информация о современном изменении климата в Центральной Азии содержится также в Сводном ежегодном сообщении о состоянии и изменении климата на территориях государств-участников СНГ [10].

Несмотря на разные временные периоды оценки и разные наборы данных в Национальных сообщениях республик Центральной Азии об изменении климата, в работе [11] подведен итог, что все крупномасштабные исследования отмечают сильную тенденцию к потеплению в Центральной Азии, которая ускорилась в последние годы.

Согласно ОД [5], даже если будут предприниматься решительные меры по сокращению выбросов парниковых газов, вызванных человеческой деятельностью, глобальное потепление будет продолжаться в течение достаточно длительного времени из-за естественной инерционности климатической системы Земли. Таким образом, оценка не только наблюдаемых, но и вероятных изменений климата в будущем является актуальной задачей. Во многих работах, таких, как [12],

показана важность знания изменений в режиме температуры в бассейне р. Амудария вследствие разноплановых воздействий таких изменений.

Цель проведенного анализа – получить оценку вероятного изменения режима температуры в бассейне Амудария в предстоящие десятилетия в условиях, заложенных в сценариях мирового экономического развития.

Материалы и методы исследования. Территория бассейна (рисунок 1) принята в соответствии с базой данных HydroSHEDS (<https://www.hydrosheds.org>), которая предоставляет ученым, занимающимся гидрологическими и экологическими исследованиями, широкий спектр глобальных цифровых данных о реках, озерах и водосборах, позволяя проводить углубленные анализы в различных масштабах. Данные HydroSHEDS свободно доступны в стандартных форматах ГИС и образуют геопространственную структуру для широкого спектра оценок, включая гидрологические, экологические, природоохранные, социально-экономические и медицинские приложения.

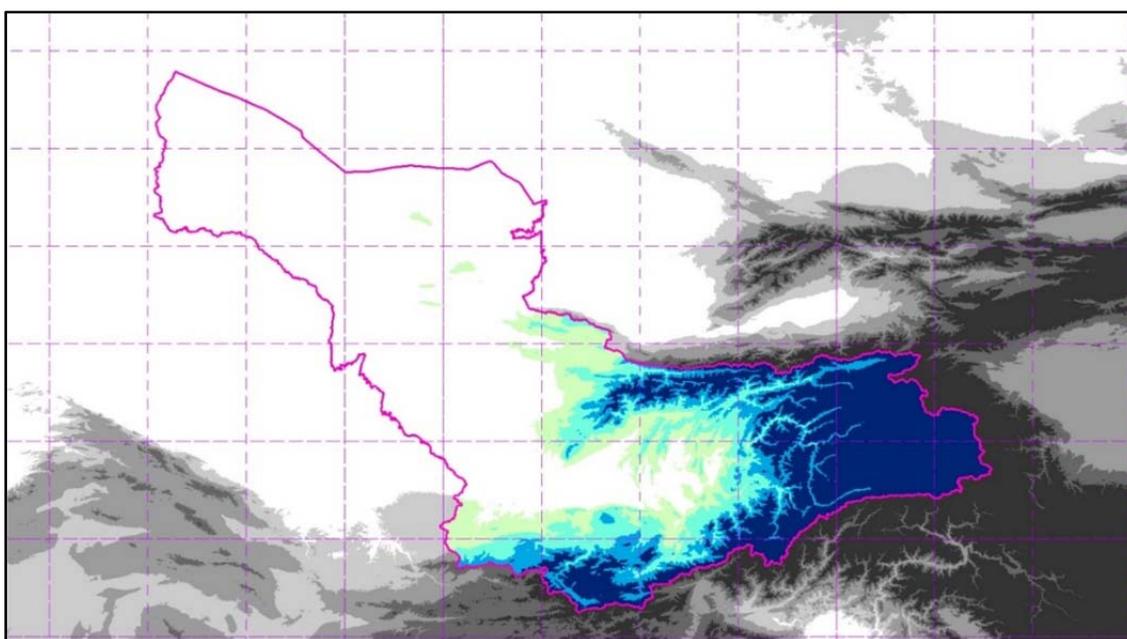


Рисунок 1 – Бассейн реки Амудария с высотными зонами 0-500; 500-1000; 1000-2000; 2000-3000 и более 3000 м

Figure 1 – Amudarya river basin with altitude zones 0-500; 500-1000; 1000-2000; 2000-3000 and more than 3000 m

Необходимость разработки сценариев изменения регионального климата возникла как следствие быстрого его глобального изменения. Для бассейна Амударии результаты таких исследований отражены в национальных сообщениях стран региона и других исследованиях. В Таджикистане и Узбекистане для оценки уязвимости и рисков использованы усреднённые мульти-модельные сценарии климата (на основе моделей глобального климата CMIP5) среднегодового изменения температуры и атмосферных осадков для разных будущих периодов при различных сценариях глобальных выбросов CO₂ (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) [7, 8]. Для Афганистана были использованы результаты эксперимента Cordex с прогнозами региональной климатической модели при сценариях глобальных выбросов CO₂ RCP4.5 и RCP8.5 [13]. Для Туркменистана использованы результаты мультимодельного ансамбля моделей глобального климата CMIP3 при сценариях выбросов SRES-A1F1 и SRES-B1 [9]. В работе [1], опубликованной в 2018 г., для оценки влияния климатических изменений на водные ресурсы в сельском хозяйстве применялись региональные климатические модели REMO-0406 и REMO-0507 с разрешением широтно-долготной сетки 0,5°×0,16°. Моделирование проводилось с учетом сценария A1B, характеризующегося высокими темпами роста концентрации парниковых газов в течение XXI века и использованного в числе других сценариев в Четвертом докладе МГЭИК.

В рамках анализа задействованы результаты шестой фазы международного проекта сравнения климатических моделей (CMIP6). Использование обновленных версий климатических моделей позволило учесть последние достижения в области моделирования климата и получить более надежные оценки антропогенного воздействия [15]. Важной целью CMIP является обеспечение общедоступности модельных и мультимодельных выходных данных в стандартизированном формате. Проект CMIP был запущен в 1995 году под эгидой Рабочей группы по сопряженному моделированию Всемирной метеорологической организации (Working Group on Coupled Modelling, WGCM). Эксперименты CMIP также включают интегрирование с оценками изменений исторических радиационных воздействий с определением будущих изменений. Сравнение между прогнозами будущей температуры CMIP3, CMIP5 и CMIP6 и наблюдениями, которые послужили основой для 4-го, 5-го и 6-го оценочных докладов МГЭИК, показывает, что глобальное потепление, прогнозируемое всеми CMIP, немного ниже наблюдаемого [16]. Наблюдаемое потепление ближе к верхнему уровню прогнозируемых – будущие климатические сценарии CMIP с более высокими выбросами парниковых газов, по-видимому, являются наиболее реалистичными.

Модели CMIP6 предоставляют более детальное и точное описание климатических процессов благодаря усовершенствованным физическим, химическим и биологическим модулям, а также повышенному пространственному разрешению. Это позволило более точно воспроизвести текущее состояние климата и его долгосрочные исторические изменения. Согласно мультимодельной оценке CMIP6 средняя глобальная температура у поверхности земли увеличивается в темпе, близком к наблюдаемому. Несмотря на то, что модели CMIP6 значительно улучшили понимание климатической системы, они все еще не полностью устранили некоторые различия между наблюдаемыми и смоделированными за тот же исторический период региональными режимами осадков, хотя повышение разрешения позволило более точно моделировать мелкомасштабные процессы, включая статистические характеристики суточных осадков.

Исследования глобального изменения климата опираются на многочисленные предположения и факторы, связанные с политикой и развитием общества. Всеобщие социально-экономические пути развития (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) были разработаны совместными усилиями международной группы ученых-климатологов, экономистов и специалистов по моделированию энергетических систем для проведения комплексного междисциплинарного анализа. Их также называют «историями, которые произошли в будущем» [17]. Сценарии SSP представляют собой совокупность альтернативных траекторий социально-экономического развития, основанных на пяти различных нарративах [18]. Они позволяют оценить, как различные социально-экономические факторы могут повлиять на климатическую систему. Для каждого сценария SSP существует достаточная база модельных данных, обеспечивающая репрезентативность полученных результатов.

Среди пяти сценариев SSP наиболее тщательно изучаемыми являются SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Эти сценарии представляют собой два варианта будущего развития, отличающихся уровнем выбросов парниковых газов и степенью потепления. Сценарий SSP5-8.5 предполагает подход, при котором выбросы CO₂ продолжают расти за пределами XXI века, приводя к значительному повышению глобальной температуры. В тоже время сценарий SSP2-4.5 отражает более умеренный рост температуры, связанный с тем, что на глобальном уровне будут предприняты систематические усилия для снижения выбросов парниковых газов, что позволит стабилизировать их концентрацию к 2100 году. SSP2-4.5 описывает сценарий, в котором глобальное развитие продолжает следовать текущей траектории, без резких сдвигов в сторону более устойчивого или менее устойчивого развития. Хотя сценарий SSP5-8.5 представляется как крайне пессимистичный, его анализ важен из-за неопределенности в поведении углеродного цикла. Существуют риски, что даже при умеренных выбросах (как в сценарии SSP2-4.5) из-за непредсказуемых реакций климатической системы концентрация парниковых газов может достичь уровней, характерных для самого экстремального сценария.

Для оценки будущих климатических изменений в бассейне Амударии использовалась онлайн-платформа МГЭИК [19] (<http://interactive-atlas.ipcc.ch/>). Благодаря интерактивному интерфейсу данной платформы результаты моделей климата, включая оценки некоторых индексов экстремальных явлений, стали более доступными для широкого круга специалистов, что облегчает их применение в различных областях, связанных с климатом.

Результаты и их обсуждение. Согласно результатам моделей CMIP6 ожидается, что в бассейне Амударии температура приземного воздуха будет продолжать повышаться во все сезоны года. В таблице 1 указаны средние, минимальные и максимальные значения изменений сезонных характеристик режима температуры воздуха, осредненных по территории трансграничного бассейна р. Амудария и по отдельным высотным зонам. Эти изменения представлены диапазоном значений, соответствующих смоделированной реакции регионального климата (в данной случае приземной температуры воздуха) на умеренный (SSP2-4.5) и жесткий (SSP5-8.5) сценарии глобального антропогенного радиационного воздействия.

Таблица 1 – Вероятное повышение средней сезонной температуры воздуха (°C): среднее (ср.), минимальное (мин.) и максимальное (макс.) значение по территории трансграничного бассейна Амудария и высотным зонам в соответствии со сценариями SSP2-4.5 и SSP5-8.5 к 2050 г. (2041-2060 гг.) относительно периода 1986-2005 гг.

Table 1 – Probable increase in the average seasonal air temperature (°C): average (av.), minimum (min.) and maximum (max.) values for the territory of the transboundary Amudarya basin and high-altitude zones in accordance with scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 by 2050 (2041-2060) relative to the period from 1986 to 2005

Высотная зона, м	Год			Зима			Весна			Лето			Осень		
	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.
	Сценарий SSP2-4.5														
Весь бассейн	2,2	2,1	2,4	2,1	1,8	2,7	2,0	1,8	2,3	2,4	2,2	2,6	2,3	2,1	2,6
0-500	2,2	2,1	2,3	2,0	1,8	2,5	2,0	1,8	2,3	2,5	2,3	2,6	2,2	2,1	2,3
500-1000	2,2	2,1	2,3	2,1	1,8	2,5	1,9	1,8	2,1	2,4	2,3	2,5	2,3	2,2	2,3
1000-2000	2,2	2,1	2,3	2,2	1,9	2,5	1,9	1,8	2,1	2,4	2,3	2,5	2,3	2,2	2,4
2000-3000	2,3	2,1	2,4	2,3	1,9	2,7	2,0	1,8	2,2	2,4	2,2	2,5	2,3	2,2	2,5
Выше 3000	2,2	2,1	2,4	2,2	2,0	2,7	2,0	1,8	2,2	2,4	2,2	2,5	2,4	2,2	2,6
	Сценарий SSP5-8.5														
Весь бассейн	2,9	2,8	3,2	2,8	2,4	3,6	2,7	2,5	3,1	3,2	2,9	3,4	3,0	2,7	3,4
0-500	2,9	2,8	3,1	2,8	2,4	3,4	2,7	2,5	3,1	3,3	3,1	3,4	2,9	2,7	3,0
500-1000	2,9	2,8	3,1	2,8	2,5	3,3	2,6	2,5	2,8	3,2	3,1	3,3	2,9	2,8	3,1
1000-2000	2,9	2,8	3,1	3,0	2,5	3,3	2,7	2,5	2,9	3,2	3,0	3,3	3,0	2,8	3,2
2000-3000	3,0	2,9	3,2	3,1	2,6	3,6	2,7	2,5	3,0	3,1	3,0	3,3	3,0	2,9	3,3
Выше 3000	3,0	2,9	3,2	2,9	2,6	3,6	2,7	2,5	3,0	3,1	2,9	3,2	3,2	2,9	3,4

К середине столетия вероятные изменения сезонных температур по всей территории укладываются в диапазон: 1,8-3,6 °C для зимних; 1,8-3,1 °C для весенних; 2,2-3,4 °C для летних и 2,1-3,4 °C для осенних температур. Средние годовые температуры могут повыситься на 2,1-3,2 °C. Детальное распределение изменения температуры по территории бассейна в зависимости от сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 приведено на рисунке 2. Необходимо отметить, что по сценарию SSP5-8.5 можно ожидать более значительного потепления на 0,6-0,9 °C по сравнению с результатами по сценарию SSP2-4.5.

Отдельно выделим изменения в высотной зоне более 3000 м, где расположены ледниковые системы горных массивов бассейна. Здесь величина вероятного повышения средних сезонных температур составляет от 1,8-3,0 °C в весенний период до 2,0-3,6 °C в зимний период.

На рисунке 3 показано изменение средних месячных температур, осредненных по различным высотным зонам бассейна р. Амудария в соответствии со сценарием SSP5-8.5 к 2050 г. Темпы повышения температуры воздуха неоднородны по высотным зонам бассейна. В отдельные месяцы года выделяется несколько характерных черт: для всех высотных зон максимальный рост температуры воздуха ожидается с июля по сентябрь (более чем на 3,0 °C); минимальный – в апреле мае (на 2,4-2,6 °C). В теплый период увеличение температуры либо примерно одинаковый во всех высотных зонах (с апреля по июнь, сентябрь), либо с высотой темп потепления несколько уменьшается, как в самые жаркие месяцы – в юле и в августе. С октября по декабрь рост температуры усиливается с высотой и достигает максимума на высотах более 3000 м, с января по

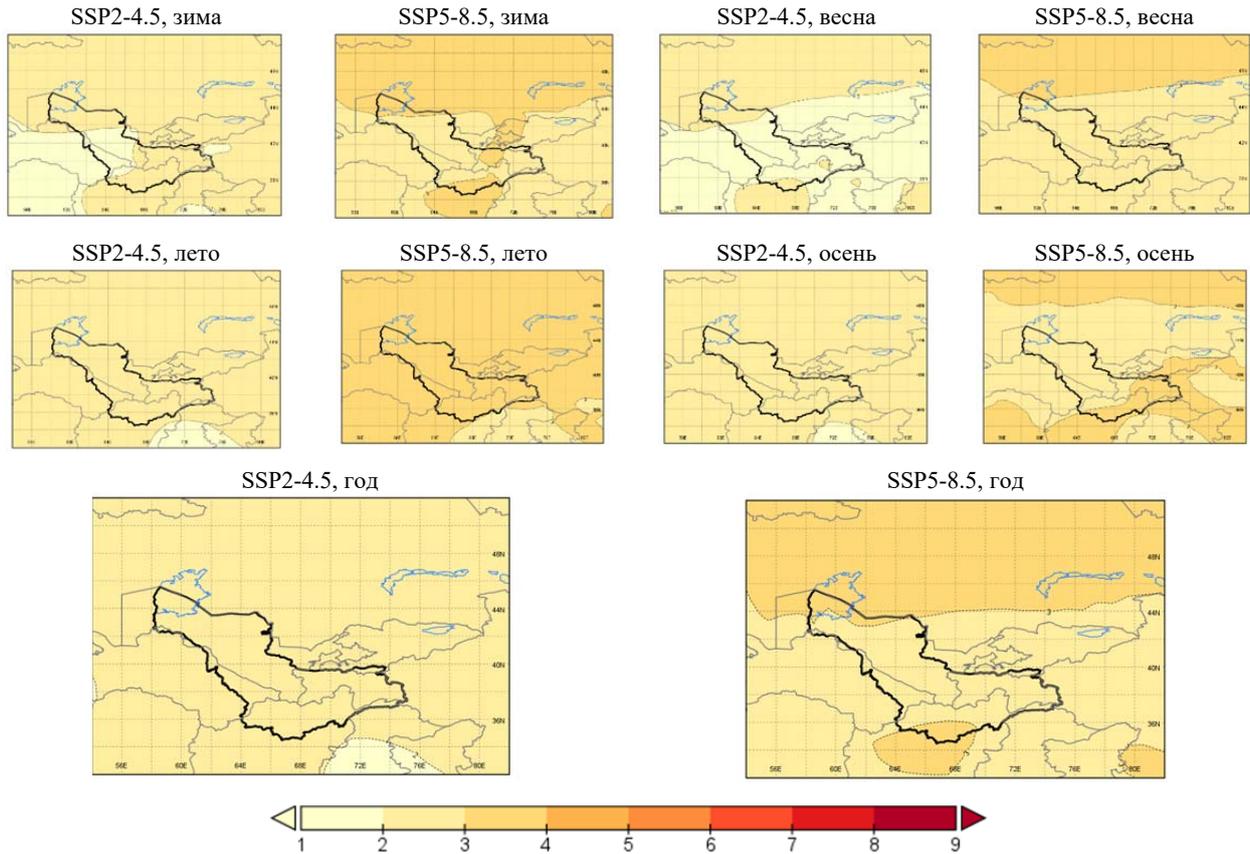


Рисунок 2 – Вероятное изменение средней сезонной и годовой температуры воздуха в бассейне р. Амудария при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Изменения рассчитаны к 2050 г. (2041-2060 гг.) относительно периода 1986-2005 гг.

Figure 2 – Probable change in the average seasonal and annual air temperature on the territory of the Amudarya River basin under scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The changes are calculated by 2050 (2041-2060) relative to the period from 1986 to 2005

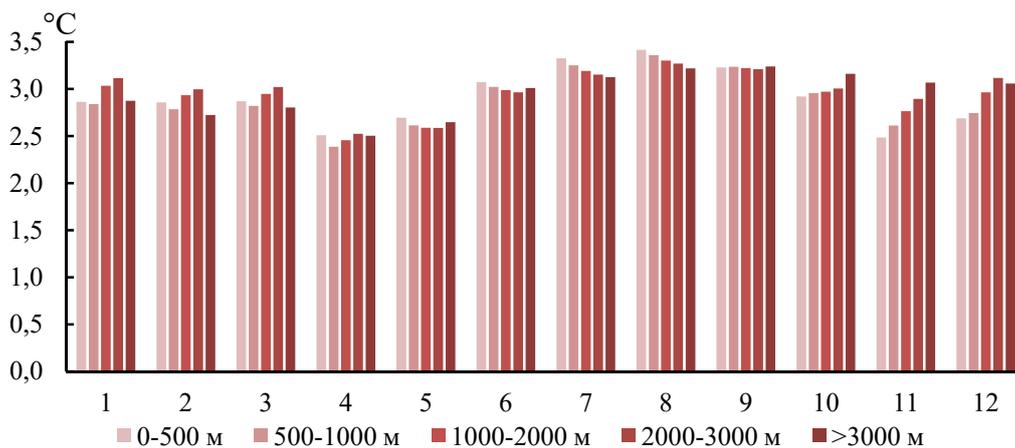


Рисунок 3 – Изменение средней месячной температуры воздуха (°C), осредненное по различным высотным зонам трансграничного бассейна р. Амудария в соответствии со сценарием SSP5-8.5 к 2050 г. (2041-2060 гг.) относительно периода 1986-2005 гг.

Figure 3 – The change in the average monthly air temperature (°C) averaged over various altitude zones of the Amudarya River transboundary basin in accordance with the scenario SSP5-8.5 by 2050 (2041-2060) relative to the period from 1986 to 2005

март величина повышения температуры на этих высотах минимальна по сравнению с нижележащими зонами.

Следует отметить, что ожидаемые изменения в сезонных температурах между различными высотными поясами, как правило, отличаются незначительно – на доли градуса. Внутри высотных зон отличия в темпах потепления могут быть более существенные и достигать или даже превышать 1 °С. Это в наибольшей степени характерно для равнинных территорий в зимний период, что объясняется их значительной протяженностью с севера на юг (см. рисунок 2).

Повышение средних уровней температуры ведет к изменениям в других характеристиках режима температуры. Так, вероятно увеличение значений абсолютного максимума суточной температуры воздуха (индекс ТХх, значения которого представляют собой выборку максимального значения из суточных максимумов температуры для каждого месяца), которое в соответствии со сценарием SSP2-4.5 составит более 2 °С практически во всех высотных зонах во все месяцы года и даже более 3,0 °С в феврале-марте и июле-августе. При более «жестком» сценарии SSP5-8.5 повышение абсолютных максимумов более значительное – на 0,3-1,1 °С и составляет 2,1-4,3 °С. В высотной зоне более 3000 м в отдельные месяцы рост абсолютного максимума может составить более 3-4 °С. Распределение по территории бассейна изменения годового абсолютного максимума суточной температуры воздуха приведено на рисунке 4.

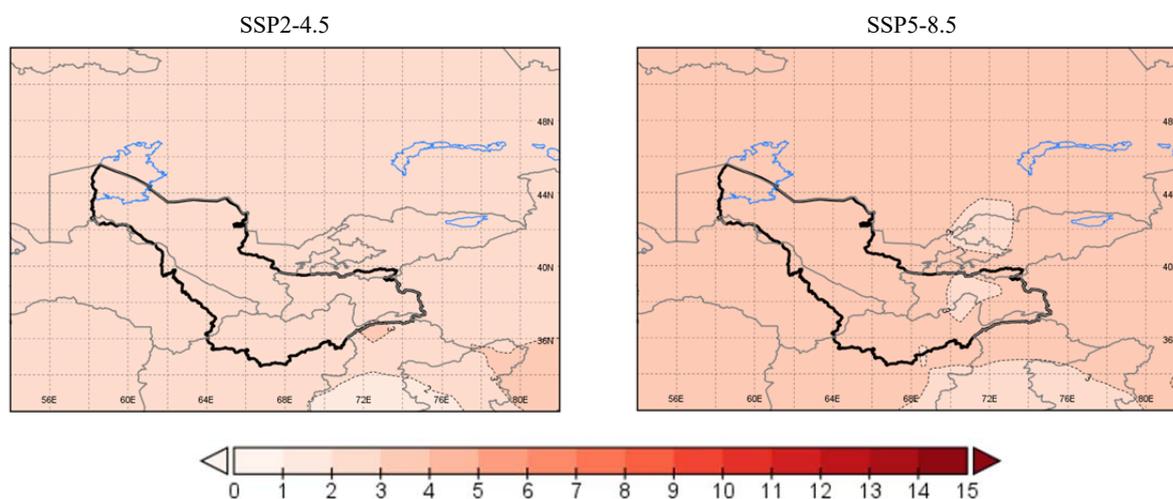


Рисунок 4 – Вероятное изменение в значениях годового абсолютного максимума температуры воздуха (индекс ТХх, °С) в бассейне р. Амударьи при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5.

Изменения рассчитаны к 2050 г. (2041-2060 гг.) относительно периода 1986-2005 гг.

Figure 4 – Probable change in the values of the annual absolute maximum air temperature (index TXx, °C) on the territory of the Amudarya River basin under scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5.

The changes are calculated by 2050 (2041-2060) relative to the period from 1986 to 2005.

Вместе с увеличением значений абсолютного максимума суточной температуры воздуха ожидается и повышение абсолютных минимальных суточных температур (индекс ТNn, значения которого представляют собой выборку минимального значения из суточных минимумов температуры для каждого месяца). Это увеличение по территории бассейна находится в диапазоне 1,6-5,5 °С. Примечательно, что в январе-феврале и ноябре-декабре рост абсолютного минимума, как ожидается, превысит увеличение абсолютного максимума, особенно в декабре, что приведет к сокращению суточной амплитуды при общем росте температуры воздуха. В марте, мае и октябре картина обратная – суточная амплитуда увеличивается. При более «жестком» сценарии SSP5-8.5 в высотной зоне более 3000 м вероятные изменения абсолютного минимума суточной температуры могут составлять более 4 °С. Распределение по территории бассейна изменения годового абсолютного максимума суточной температуры воздуха приведено на рисунке 5.

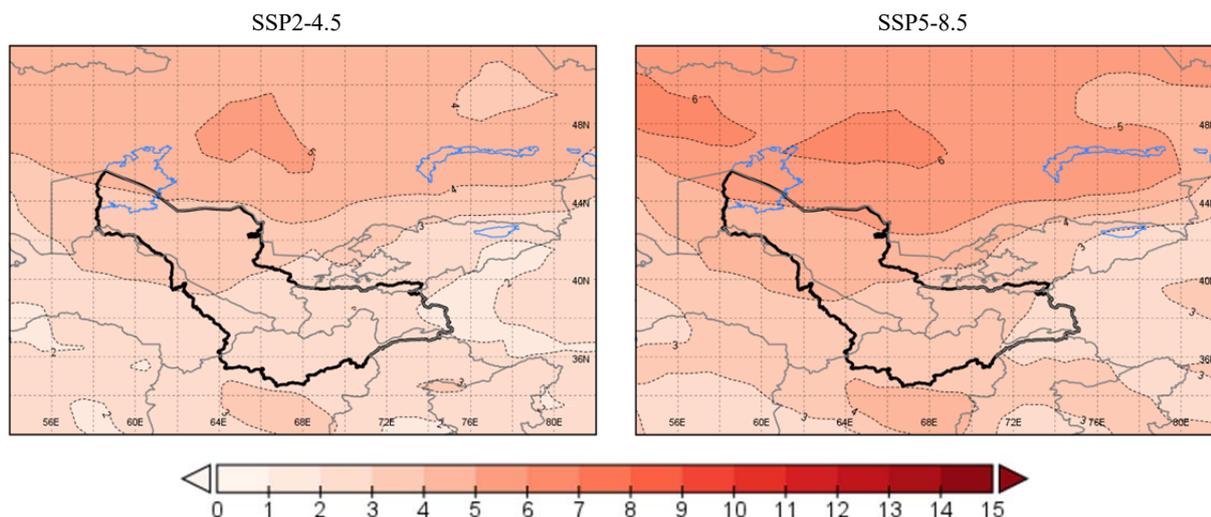


Рисунок 5– Вероятное изменение в значениях годового абсолютного минимума температуры воздуха (индекс TNn, °C) в бассейне р. Амудария при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5.

Изменения рассчитаны к 2050 г. (2041-2060 гг.) относительно периода 1986-2005 гг.

Figure 5– Probable change in the values of the annual absolute minimum air temperature (TNn index, °C) on the territory of the Amudarya River basin under scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5.

The changes are calculated by 2050 (2041-2060) relative to the period from 1986 to 2005

Еще одной характерной чертой в ожидаемом изменении режима температуры воздуха является увеличение повторяемости дней с экстремально высокими температурами воздуха. Например, температуры выше 35 °C (индекс SU35, рисунок 6, таблица 2) к середине века могут случаться значительно чаще, особенно на равнинной территории, где таких дней будет больше максимально на 25-33 в зонах до 2000 м. Индекс SU40, отражающий количество дней с температурой выше 40 °C, показывает их значительное увеличение на 20-35 дней. В то же время для высокогорных районов (выше 2000 м) оценки изменений этого индекса, полученные с помощью мультимодельного ансамбля, характеризуются высокой неопределенностью из-за превышения порога внутренней изменчивости более чем в 66% моделей, что естественно для данной высотной зоны.

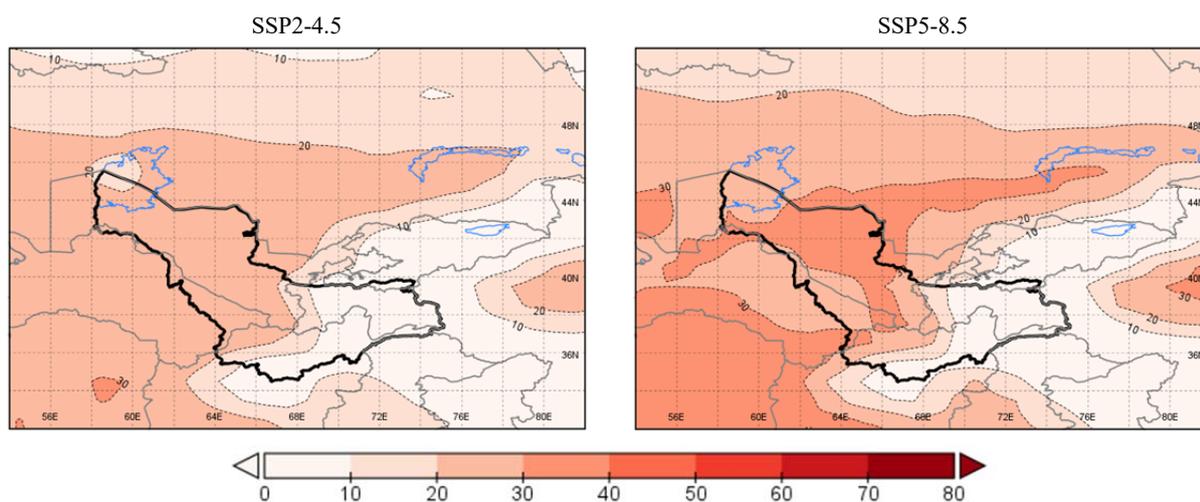


Рисунок 6 – Вероятное изменение количества дней с температурой выше 35 °C (индекс SU35, дни) в бассейне р. Амудария при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Изменения рассчитаны к 2050 г. (2041-2060 гг.) относительно периода 1986-2005 гг.

Figure 6 – Probable change in the number of days with temperatures above 35 °C (SU35 index, days) on the territory of the Amudarya River basin under scenarios SSP 2.4.5 and SSP 5.8.5.

Changes are calculated by 2050 (2041-2060) relative to the period from 1986 to 2005

Таблица 2 – Вероятное изменение годового количества суток, когда суточный максимум температуры воздуха > 35 °С (индекс SU35, сут) и > 40 °С (индекс SU40, сут): среднее (ср.) и максимальное (макс.) значение в трансграничном бассейне р. Амудария и его высотных зонах в соответствии со сценариями SSP2-4.5 и SSP5-8.5 к 2050 г. (2041-2060 гг.)

Table 2 – Probable change in the annual number of days when the daily maximum air temperature is > 35 °C (SU35 index, day) and > 40 °C (SU40 index, day): average (av.) and maximum (max.) values for the territory of the transboundary basin of the Amu Darya River and its altitude zones in accordance with scenarios SP2-4.5 and SSP5-8.5 by 2050 (2041-2060)

Высотная зона, м	Индекс			
	SU35		SU40	
	ср.	макс.	ср.	макс.
Сценарий SSP2-4.5				
0-500	23	25	19	28
500-1000	19	26	11	24
1000-2000	12	25	5	20
2000-3000	–	–	–	–
Выше 3000	–	–	–	–
Сценарий SSP5-8,5				
0-500	29	32	25	35
500-1000	25	33	16	31
1000-2000	16	32	8	26
2000-3000	–	–	–	–
Выше 3000	–	–	–	–

Важной характеристикой климата для состояния снежного покрова и ледниковых систем является повторяемость дней, когда температура воздуха опускается ниже 0 °С (индекс FD0). От этого, например, зависит в твердой или жидкой фазе будут выпадать атмосферные осадки. При ожидаемом повышении температуры повторяемость морозных дней будет сокращаться даже в зимний период (таблица 3). С увеличением высоты места это сокращение становится менее значительным: если на равнине оно составляет 9-18 дней, то в среднем по горной зоне выше 3000 м сокращение в зимний период всего на 3-4 дня, и оно неустойчивое. В весенний и осенний периоды, а также летом, наоборот, чем больше высота места, тем значительнее уменьшение повторяемости дней, когда температура воздуха опускается ниже 0 °С. В результате в целом за год на равнине морозных дней станет меньше в среднем на 23-29 дней, в высотной зоне выше 3000 м – в среднем на 25-34 дня (таблица 3, рисунок 7).

Климатические проекции связаны с определенной степенью неопределенности. Существуют три основных источника неопределенности в климатических прогнозах: естественная изменчивость климатической системы, неопределенность моделей климата и неопределенность сценариев. Естественная изменчивость относится к климатическим колебаниям, которые происходят без какого-либо влияния человека и могут быть непредсказуемыми (например, извержения вулканов, изменения солнечной активности и т.п.). Существует множество климатических моделей, и хотя все они были разработаны в соответствии с основными законами физики, отдельные климатические модели различаются по ряду аспектов, таких, как уровень упрощения, размер сетки модели и способ, которым они представляют физические явления, особенно те, которые слишком малы для явного моделирования (например, облака, взаимодействие атмосферы и поверхности, представление почвенного и растительного покрова). Таким образом, каждая модель уникальна и будет генерировать немного разные прогнозы. Чтобы устранить этот тип неопределенности, часто используются ансамбли климатических моделей как в данном исследовании. Эволюция выбросов парниковых газов также неопределенна, и в настоящее время невозможно точно установить, какими будут будущие выбросы. Следовательно, модели запускаются с различными траекториями выбросов, которые основаны на наборе предположений о движущих силах, таких, как технологические изменения, демографическое и социально-экономическое развитие, землепользование и их ключевые взаимодействия. Сценарии предоставляют альтернативные видения того, как может

разворачиваться будущее, и, следовательно, влияют на результаты климатических прогнозов. Важно понимать, что климатические проекции не являются точными прогнозами, а скорее представляют собой диапазон возможных изменений климата в ответ на заложенные в модели сценарии изменения концентрации парниковых газов в атмосфере.

Таблица 3 – Вероятное изменение годового/сезонного количества суток, когда суточный минимум температуры воздуха < 0 °С (индекс FD0, сут): среднее (ср.), минимальное (мин.) и максимальное (макс.) значение в трансграничном бассейне р. Амудария и его высотных зонах в соответствии со сценариями SSP2-4.5 и SSP5-8.5 к 2050 г. (2041-2060 гг.).

Table 3 – Probable change in the annual/seasonal number of days when the daily minimum air temperature is < 0 °C (index FD0, day): average (av.), minimum (min.) and maximum (max.) values for the territory of the transboundary basin of the Amudarya River and its altitude zones in accordance with scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 by 2050 (2041-2060)

Высотная зона, м	Год			Зима			Весна			Лето			Осень		
	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.
Сценарий SSP2-4.5															
Весь бассейн	-23	-19	-29	-9	0	-14	-6	-3	-10	-2	0	-15	-7	-4	-13
0-500	-23	-19	-26	-12	-9	-14	-5	-3	-8	0	0	0	-5	-4	-8
500-1000	-22	-19	-29	-11	-6	-13	-5	-3	-9	0	0	0	-6	-4	-13
1000-2000	-24	-19	-29	-10	-3	-13	-6	-3	-10	-1	0	-5	-8	-4	-13
2000-3000	-25	-19	-29	-7	-1	-13	-7	-3	-10	-2	0	-9	-9	-4	-13
Выше 3000	-25	-21	-29	-3	0	-11	-7	-3	-10	-7	0	-15	-9	-5	-13
Сценарий SSP5-8.5															
Весь бассейн	-31	-25	-39	-13	0	-18	-7	-4	-13	-2	0	-18	-8	-5	-16
0-500	-29	-25	-35	-16	-13	-18	-7	-4	-10	0	0	0	-6	-5	-11
500-1000	-29	-25	-38	-16	-8	-18	-6	-4	-12	0	0	-4	-7	-5	-15
1000-2000	-32	-26	-38	-13	-4	-18	-8	-4	-13	-1	0	-8	-10	-5	-16
2000-3000	-35	-26	-39	-10	-1	-18	-10	-4	-13	-2	0	-12	-12	-5	-16
Выше 3000	-34	-27	-39	-4	0	-16	-9	-4	-13	-9	0	-18	-11	-6	-16

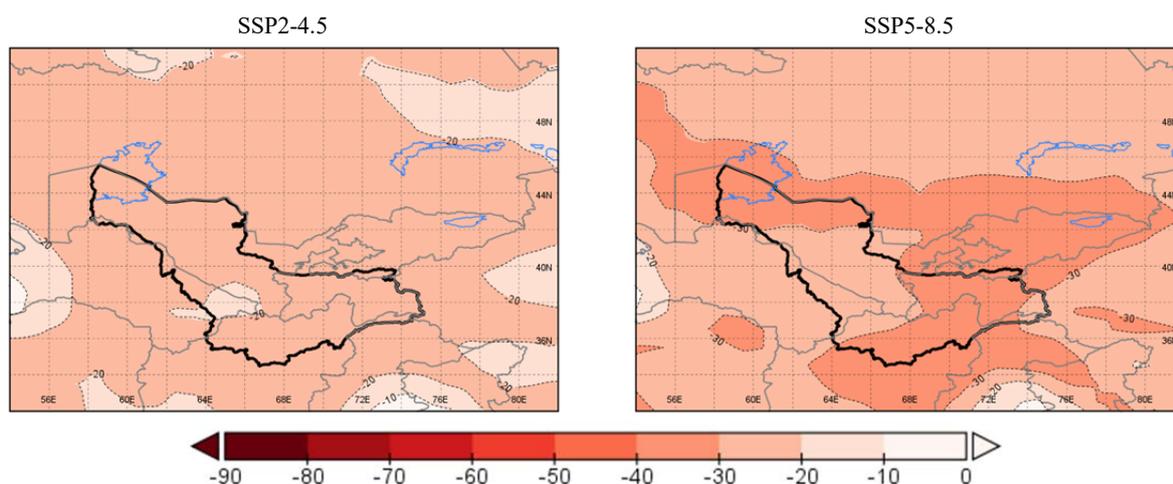


Рисунок 7 – Вероятное изменение в количестве дней с морозом, когда суточный минимум температуры опускается ниже 0 °С (индекс FD0, дни) в бассейне р. Амудария при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Изменения рассчитаны к 2050 г. (2041-2060 гг.) относительно периода 1986-2005 гг.

Figure 7 – Probable change in the number of days with frost when the daily minimum temperature drops below 0 °C (index FD0, days) in the territory of the Amudarya River basin under scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. Changes are calculated by 2050 (2041-2060) relative to the period 1986-2005.

Для снижения неопределенности результатов моделирования будущего климата при подготовке Интерактивного атласа использован именно мультимодельный подход. Также принимая во внимание, что модели глобального климата имеют некоторые погрешности при моделировании климата за исторический период, нами показаны не абсолютные значения исследованных характеристик режима температуры для периода 2041-2060 гг., а их изменения, характеризующие чувствительность моделей к воздействию сценариев концентрации выбросов на климатическую систему.

При подготовке Атласа МГЭИК для каждой ячейки широтно-долготной сетки определена степень согласованности результатов моделей и указаны ячейки, где отсутствуют устойчивые изменения (менее 66 % моделей показывают изменение, превышающее порог внутренней изменчивости). Выявлены следующие регионы с неустойчивым изменением отдельных характеристик режима температуры:

– изменение в абсолютных минимумах температуры (индекс TNn) на равнинной территории бассейна при сценарии 4.5;

– изменение в количестве дней с температурой выше 35 и 40 °С (индексы SU35 и SU40) в высокогорных районах при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5;

– изменение в количестве дней, когда суточный минимум температуры опускается ниже 0 °С (индекс FD0, дни) при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5 в зимний период в высокогорье и в летний период в низкогорной зоне бассейна.

Заключение и выводы. Смоделированная региональная реакция температурного режима на сценарии антропогенного воздействия указывает на повышение температуры в бассейне р. Амудария во все сезоны года.

Согласно результатам моделей CMIP6 ожидается, что в бассейне р. Амудария температура приземного воздуха будет продолжать повышаться во все сезоны года. К середине столетия вероятные изменения сезонных температур по всей территории укладываются в диапазон: 1,8-3,6 °С для зимних; 1,8-3,1 °С для весенних; 2,2-3,4 °С для летних; и 2,1-3,4 °С для осенних температур. Средние годовые температуры могут повыситься на 2,1-3,2 °С. Увеличение средних месячных температур сопровождается уменьшением повторяемости отрицательных температур и ростом максимальных и минимальных суточных температур, а также увеличением повторяемости экстремально высоких температур (более 35 и 40 °С) на равнинной территории и в предгорной и горной местности (до высот 2000 м).

Последствия подобного изменения режима температуры в будущем могут иметь как негативные, так и позитивные последствия. Для сельского хозяйства потенциальные последствия от повышения температуры могут включать снижение производства животноводческой продукции, уменьшение доступности воды из-за увеличения испарения и снижения влажности почвы, роста повторяемости и интенсивности волн тепла зимой и жары летом, вероятно учащение засух и пыльных бурь.

Повышение температуры воздуха в горных районах ведет к удлинению периода с положительными температурами и соответственно к увеличению суммы положительных температур, к расширению зоны и сокращению сезона осадков в твердом виде, что важно для состояния ледниковых систем в верховьях бассейна, к активному таянию снега в более ранние сроки, к повышению риска прорыва ледниковых озер и селей гляциального происхождения.

Кроме того, горы являются средой обитания для многих редких и находящихся под угрозой исчезновения видов в мире, а наличие множества различных экосистем в непосредственной близости повышает экологическую чувствительность гор к изменению окружающей среды.

Быстрые изменения в высокогорном климате будут иметь последствия, выходящие далеко за пределы непосредственно горных регионов, поскольку горы являются «водонапорными башнями» и основным источником воды для большого количества населения в регионах с более низкой высотой. Социальные и экономические последствия потепления в горных регионах могут быть значительными, поэтому необходимо уделять пристальное внимание этому вопросу.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстана по теме «Ледниковые сис-

темы трансграничных бассейнов Центральной Азии: состояние, современные и прогнозные изменения, роль в обеспечении водной безопасности стран региона». Программно-целевое финансирование № BR 18574176.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Будущее бассейна Амударьи в условиях изменения климата / Под общ. ред. проф. В. А. Духовного. – Ташкент: НИЦ МКВК Центральной Азии, 2018. – 328 с.
- [2] State of the Global Climate 2023. – WMO-№ 1347. – Geneva, 2024. – 53 p.
- [3] WMO Global Annual to Decadal Climate Update. Target years: 2024 and 2024-2028 // P.27 download WMO Global Annual to Decadal Climate Update
- [4] Perkins S, LV A JR. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells // *Geophys Res Lett.* 2012; 39: L20714.
- [5] The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- [6] Klingelhöfer D., Braun M., Brüggmann D. et al. Heatwaves: does global research reflect the growing threat in the light of climate change? *Global Health* 19, 56 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12992-023-00955-4>
- [7] Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. – Душанбе, 2022. – 260 с.
- [8] Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. – Ташкент, 2016. – 220 с.
- [9] Third National Communication of Turkmenistan under the United Nations Framework Convention on Climate Change. – Ashgabat, 2015. – 160 p.
- [10] Сводное ежегодное сообщение о состоянии и изменении климата на территориях государств-участников СНГ за 2023 год [Электрон. ресурс]. – 2024. – URL: <https://seack.meteoinfo.ru/media/images-seack/seack/monitoring/cis-climate-2023.pdf> (дата обращения: 12.04.2024).
- [11] Isabell Haag, Philip D. Jones and Cyrus Samimi. Central Asia's Changing Climate: How Temperature and Precipitation Have Changed across Time, Space, and Altitude // *Climate*. – 2019, 7(10), 123; <https://doi.org/10.3390/cli7100123>
- [12] Доклад «Окружающая среда и безопасность в бассейне Амударьи»/ЮНЕП, ГРИД-Арендаль, Zoi Environment Network. – 2011. – 112 с.
- [13] Afghanistan's Second National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change. – Kabul, 2017. – 98 p.
- [14] Climate Change 2021: Annex II: Models [Gutiérrez, J.M., A.-M. Tréguier (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – P. 2087-2138. doi:10.1017/9781009157896.016.
- [15] Veronika Eyring, Sandrine Bony, Gerald A. Meehl, Catherine A. Senior, Bjorn Stevens, Ronald J. Stouffer, Karl E. Taylor. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev.* – 2016. – No. 9. – P. 1937-1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- [16] Carvalho, D., Rafael, S., Monteiro, A. V. Rodrigues, M. Lopes, A. Rocha. How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming // *Sci Rep.* – 2022. – No. 12. – 11983 p. doi: 10.1038/s41598-022-16264-6.
- [17] IPCC, 2021: Annex VII: Glossary [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – P. 2215-2256. doi:10.1017/9781009157896.022.
- [18] Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview // *Global Environmental Change.* – 2017. – No. 42. – P. 153-168.
- [19] Gutiérrez J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma, L.M. Alves, M. Amjad, I.V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon, 2021: Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 1927-2058. doi:10.1017/9781009157896.021.

REFERENCES

- [1] The Future of the Amu Darya Basin in the Context of Climate Change [Text] / Edited by Prof. V. A. Dukhovny. Tashkent: Central Asian Scientific and Information Center of ICWC, 2018. 328 p. (in Russ.).
- [2] State of the Global Climate 2023. WMO-No. 1347. Geneva, 2024. 53 p.
- [3] WMO Global Annual to Decadal Climate Update. Target years: 2024 and 2024-2028 // P.27 download WMO Global Annual to Decadal Climate Update.
- [4] Perkins S, LV A JR. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells // *Geophys Res Lett.* 2012; 39: L20714.
- [5] The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- [6] Klingelhöfer, D., Braun, M., Brüggmann, D. et al. Heatwaves: does global research reflect the growing threat in the light of climate change? // *Global Health* 19, 56 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12992-023-00955-4>
- [7] The Fourth National Communication of the Republic of Tajikistan under the UN Framework Convention on Climate Change. Dushanbe, 2022. 260 p. (in Russ.).
- [8] The Third National Communication of the Republic of Uzbekistan under the UN Framework Convention on Climate Change. Tashkent, 2016. 220 p. (in Russ.).
- [9] Third National Communication of Turkmenistan under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ashgabat, 2015. 160 p.
- [10] Consolidated Annual Report on the State and Change of Climate in the Territories of the CIS Member States for 2023 [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://seakc.meteoinfo.ru/media/images-seakc/seakc/monitoring/cis-climate-2023.pdf> (accessed: 12.04.2024) (in Russ.).
- [11] Isabell Haag, Philip D. Jones and Cyrus Samimi. Central Asia's Changing Climate: How Temperature and Precipitation Have Changed across Time, Space, and Altitude // *Climate*. 2019, 7(10), 123; <https://doi.org/10.3390/cli7100123>
- [12] Report "Environment and Security in the Amu Darya Basin" / UNEP, GRID-Arendal, Zoi Environment Network. 2011. 112 p. (in Russ.).
- [13] Afghanistan's Second National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Kabul, 2017. 98 p.
- [14] Climate Change 2021: Annex II: Models [Gutiérrez, J M., A.-M. Tréguier (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 2087-2138. doi:10.1017/9781009157896.016.
- [15] Veronika Eyring, Sandrine Bony, Gerald A. Meehl, Catherine A. Senior, Bjorn Stevens, Ronald J. Stouffer, and Karl E. Taylor. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev.* 2016. No. 9. P. 1937-1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- [16] Carvalho, D., Rafael, S., Monteiro, A. V. Rodrigues, M. Lopes & A. Rocha. How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming // *Sci Rep.* 2022. No. 12. 11983 p. doi: 10.1038/s41598-022-16264-6.
- [17] IPCC, 2021: Annex VII: Glossary [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 2215-2256. doi:10.1017/9781009157896.022.
- [18] Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview // *Global Environmental Change.* 2017. No. 42. P. 153-168.
- [19] Gutiérrez, J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma, L.M. Alves, M. Amjad, I.V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon, 2021: Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1927-2058. doi:10.1017/9781009157896.021.

С. А. Долгих^{*1}, Е. Е. Белдеубаев², Г. Е. Турумова³

^{1*} Жетекші ғылыми қызметкер, география ғылымдарының кандидаты
(ЮНЕСКО қамқорлығымен 2 санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық орталығы,
Almaty, Kazakhstan; Svetlana_Dolgikh@mail.ru)

² Жетекші ғылыми қызметкер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің докторанты
(ЮНЕСКО қамқорлығымен 2 санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық орталығы,
Almaty, Kazakhstan; yerke_beldeubayev@mail.ru)

³ Жетекші инженер, жаратылыстану ғылымдарының магистрі (ЮНЕСКО қамқорлығымен
2 санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық орталығы, Almaty, Kazakhstan; turumova94@mail.ru)

ОСЫ ҒАСЫРДЫҢ ОРТАСЫНА ҚАРАЙ СМІР6 МОДЕЛЬДЕРІ БОЙЫНША АМУДАРИЯ ӨЗЕНІ БАССЕЙНІНДЕГІ ТЕМПЕРАТУРА РЕЖИМІНІҢ КҮТІЛЕТІН ӨЗГЕРІСТЕРІ

Аннотация. Бұл зерттеу ХХІ ғасырдың ортасына қарай Амудария өзенінің бассейніндегі температура режимінің сипаттамаларындағы ықтимал өзгерістерді қарастырды. Өзгерістерді бағалау жаһандық дамудың әлеуметтік-экономикалық жолының және шоғырланудың өкілдік жолдарының (SSP2-4.5 және SSP5-8.5) екі біріктірілген сценарийінде біріктірілген модельдерді өзара салыстыру жобасының (CMIP6) алтыншы кезеңіне қатысқан жаһандық климаттың біріктірілген модельдерінің көп модельді ансамбльдерінің нәтижелері негізінде алынды. Нәтижелер бассейн аумағында жылдың барлық маусымдарында жылыну үрдісі жалғасады деп күтілуде. Ғасырдың ортасына қарай мезгілдік температураның ықтимал өзгеруі бүкіл аумаққа: қыс мезгіліне 1,8-3,6 °С; көктем мезгіліне 1,8-3,1 °С; жаз мезгіліне 2,2-3,4 °С; күз мезгіліне 2,1-3,4 °С. Жылдық орташа температура 2,1-3,2 °С-қа көтерілуі мүмкін. Тәуліктік ауа температурасының абсолютті максимумы мен минимумының мәндерінің артуы, ауаның өте жоғары температураларының қайталануының артуы (35 және 40 °С-тан жоғары) және 0 °С-тан төмен температурамен күндердің қайталануының төмендеуі күтіледі. SSP5-8,5 сценарийіне сәйкес күшті өзгерістері бар екі сценарий үшін ұқсас үлгілерді көрсететін бассейн аумағы бойынша температура режимінің сипаттамаларындағы өзгерістердің кеңістіктік таралуы берілген.

Түйін сөздер: климаттың өзгеруі, температура режимі, климаттық сценарийлер, климаттың жаһандық модельдері, CMIP6.

S. A. Dolgikh^{*1}, Ye. Ye. Beldeubayev², G. Ye. Turumova³

^{1*} PhD, Leading Researcher (Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Almaty, Kazakhstan; Svetlana_Dolgikh@mail.ru)

² Leading Researcher, Doctoral Student of al-Farabi Kazakh National University
(Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO,
Almaty, Kazakhstan; yerke_beldeubayev@mail.ru)

³ Leading Engineer, Master of Natural Sciences (Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Almaty, Kazakhstan; turumova94@mail.ru)

EXPECTED CHANGES IN THE TEMPERATURE REGIME IN THE AMUDARYA RIVER BASIN ACCORDING TO CMIP6 MODELS BY THE MIDDLE OF THE CURRENT CENTURY

Abstract. This study considers probable changes in the characteristics of the temperature regime in the Amu Darya River basin by the middle of the 21st century. The assessment of changes is based on the results of multi-model ensembles of coupled global climate models participating in the sixth stage of the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) under two combined scenarios of the global socio-economic development pathway and representative concentration pathways (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). The results indicate that the warming trend is expected to continue in all seasons of the year in the basin. By the middle of the century, probable changes in seasonal temperatures throughout the territory fit into the following range: 1.8-3.6 °C for winter; 1.8-3.1 °C for spring; 2.2-3.4 °C for summer; and 2.1-3.4 °C for autumn temperatures. Average annual temperatures may increase by 2.1-3.2 °C. An increase in the absolute maximum and minimum daily air temperatures, an increase in the frequency of extremely high air temperatures (above 35 and 40 °C) and a decrease in the frequency of days with temperatures below 0 °C are expected. The spatial distribution of changes in the characteristics of the temperature regime across the basin is given, which demonstrates similar patterns for two scenarios with stronger changes in accordance with the SSP5-8.5 scenario.

Keywords: climate change, temperature regime, climate scenarios, global climate models, CMIP6.