

Сценарии воздействия изменения климата на снежный покров Центральной Азии с высоким разрешением



Заключительный отчёт
Контракт №: 4500517801
7 июля 2025 г.

Автор: Д-р Джоэл Фиддес

Экспертный вклад по моделированию снежного покрова в проект ГЭФ-ПРООН-ЮНЕСКО по криосфере «Укрепление устойчивости стран Центральной Азии путём содействия региональному сотрудничеству в области оценки нивально-гляциальных систем для разработки комплексных методов устойчивого развития и адаптации к изменению климата».

Содержание

Содержание	3
Список сокращений	4
Список иллюстраций.....	5
Список таблиц.....	7
Резюме	8
1. Общие сведения.....	9
2. Методология.....	11
3. Данные	13
4. Реализация модели	16
5. Разработка климатообразующих факторов CMIP6	18
6. Результаты выполнения сценария снежного покрова	20
7. Веб-приложения.....	33
8. Основные выводы	35
Список литературы.....	37

Список сокращений

CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 Фаза 6 проекта взаимного сравнения связанных моделей
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды
GLIMS	Global Land Ice Measurements from Space Глобальные измерения наземных льдов из космоса
ISIMIP	Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project Проект взаимного сравнения моделей межсекторального воздействия
RCP	Representative Concentration Pathway Сценарии репрезентативных траекторий концентраций (парниковых газов)
RGI	Randolph Glacier Inventory Рэндольфский кадастр ледников
ROF	Runoff from Snowpack Сток снеготаяния/сток снеговых (талых) вод
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission Радиолокационная топографическая миссия шаттла
SSP	Shared Socioeconomic Pathway Сценарий общих социально-экономических путей
SWE	Snow Water Equivalent Водный эквивалент снега
ГЭФ	Глобальный экологический фонд
ЮНЕСКО	Организация Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры

Список иллюстраций

Рисунок 1. Результаты проекта CHARIS продемонстрировали преобладание стока от таяния снега во всех основных бассейнах высокогорной Азии, за исключением Ганга, где преобладает сток от муссонов (Armstrong et al., 2019)	10
Рисунок 2. CMIP6 — изменение средней температуры воздуха (T) в °C — потепление на 2 °C по SSP3-7.0 (относительно 1981–2010 гг.) — годовое (30 моделей). Регион: Амударья. Жирные линии выделяют использованные в данном исследовании модели из 30-модельного ансамбля, демонстрируя репрезентативность этого подмножества ансамбля. (Сгенерировано на https://interactive-atlas.ipcc.ch/)	14
Рисунок 3. CMIP6 — изменение общего количества осадков (PR) в % — потепление на 2 °C по SSP3-7.0 (относительно 1981–2010 гг.) — годовое (28 моделей). Регион: Амударья. Жирные линии выделяют использованные в данном исследовании модели из 30-модельного ансамбля, демонстрируя репрезентативность этого подмножества ансамбля. (Сгенерировано на https://interactive-atlas.ipcc.ch/)	14
Рисунок 4. Сценарии общих социально-экономических путей и комбинации радиационного воздействия к 2100 году, использованные в данном исследовании (источник: https://climate-scenarios.canada.ca/)	15
Рисунок 5. Схема цепочки моделей оценки воздействия изменения климата, реализованная в данном отчёте	16
Рисунок 6. Пример выполнения одного параметра из одной цепочки моделей для одного дня: TAMAX для MPI-ESM1-2-HR и сценария ssp245 на 1 января 2100 года	18
Рисунок 7. Пример выполнения одного параметра из одной цепочки моделей для одного дня: PSUM для MPI-ESM1-2-HR и сценария ssp245 на 1 января 2100 года	19
Рисунок 8. Обзорная карта двух областей моделирования: 1) высокогорная Центральная Азия (НМКА); 2) Казахстан (KAZ)	20
Рисунок 9. Модельная область «высокогорная Центральная Азия»	21
Рисунок 10. Климатические прогнозы CMIP6 для аномалии температуры приземного воздуха над модельными областями для сценариев умеренных (SSP2-4.5) и высоких (SSP5-8.5) выбросов для трёх сезонов (сентябрь — ноябрь, декабрь — февраль, март — май)	22
Рисунок 11. Климатические прогнозы CMIP6 для аномалии осадков над модельными областями для сценариев умеренных (SSP2-4.5) и высоких (SSP5-8.5) выбросов для трёх сезонов (сентябрь — ноябрь, декабрь — февраль, март — май)	23
Рисунок 12. Климатические прогнозы CMIP6 для осадков в виде снега над модельными областями для сценариев умеренных (SSP2-4.5) и высоких (SSP5-8.5) выбросов для трёх сезонов (сентябрь — ноябрь, декабрь — февраль, март — май)	24
Рисунок 13. Графики временных рядов всех четырёх сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5. Параметры представляют собой средние значения по всей модельной области	25

Рисунок 14. Сезонность изменения климата для показателя температуры приземного воздуха (GST) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года) (seasonalCycle_multiplot_hist_multiscenario.py).....	26
Рисунок 15. Сезонность изменения климата для показателя водного эквивалента снега (SWE) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года)	27
Рисунок 16. Сезонность изменения климата для показателя толщины снежного покрова (snd) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года)	28
Рисунок 17. Сезонность изменения климата для показателя стока снеготаяния (Rof) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года)	29
Рисунок 18. Сезонность изменения климата для показателя альбедо поверхности (alb) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года)	30
Рисунок 19. Карты аномалий показателей для периода отдалённого будущего, агрегированные по водосборам НМКА для трёх сценариев — SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5. Аномалии рассчитаны как отношение значений показателей периода отдалённого будущего (2081–2100 гг.) к историческому периоду (1981–2010 гг.). Показаны температура приземного воздуха (GST), сток снеготаяния (ROF), водный эквивалент снега (SWE), толщина снежного покрова (snd), альбедо (alb)	31
Рисунок 20. Растровые карты всех сценариев для исторического (HIST) периода (1981–2010 гг.) и сценария SSP5-8.5 для отдалённого будущего (2081–2100 гг.).....	32
Рисунок 21. Обзор сценариев изменения снежного покрова с климатом.....	33
Рисунок 22. Атлас аномалий снежного покрова	34

Список таблиц

Таблица 1. Климатические модели и сценарии, использованные в данном исследовании. Все сценарии рассчитаны на период 2015–2100 гг., исторические — на период 1970–2015 гг.	14
Таблица 2. Метеорологические переменные, используемые для управления моделью FSM...	17
Таблица 3. Основные моделируемые переменные, использованные в исследовании.....	17
Таблица 4. Цепочки моделей CMIP6, разработанные в рамках данного отчёта.....	19

Резюме

В данном отчёте представлена комплексная оценка сценариев изменения снежного покрова с климатом в будущем в Центральной Азии с акцентом на информационное обеспечение задач управления водными ресурсами, адаптации к изменению климата и регионального планирования. Используя систему ТороCLIM, мы создали топоклиматические прогнозы с высоким разрешением, которые отражают сложные процессы взаимодействия между рельефом и климатом в горных районах. Эти прогнозы служат основой для моделирования будущей динамики снежного покрова — включая толщину снежного покрова, водный эквивалент снега и сток снеготаяния — при различных сценариях изменения климата.

Мы проанализировали исторические и прогнозируемые снеговые условия на ключевых водосборах Центральной Азии, выявив изменения в сроках накопления снега, площади снежного покрова и объёмов талой воды. Полученные нами данные свидетельствуют о тенденции к более раннему таянию снега, уменьшению объёма снежного покрова на более низких высотах и значительной региональной изменчивости, связанной с рельефом и степенью подверженности воздействиям.

Чтобы обеспечить распространение и доступность знаний, мы разработали набор интерактивных веб-приложений (рис. 21, 22), которые позволяют заинтересованным сторонам визуализировать изменения снежного покрова под влиянием климата в масштабах как региона, так и бассейна. Эти инструменты позволяют ответственным структурам, научным кругам и специалистам-практикам изучать результаты различных сценариев и включать их в планы адаптации.

Сочетание передовых методов даунскейлинга, достоверного сценарного моделирования и пользовательских инструментов делает эту работу ценным источником информации для целей прогнозирования и управления связанными со снегом последствиями изменения климата в уязвимых районах горных систем Центральной Азии.

1. Общие сведения

Значение криосферы для развития региона

Криосфера, охватывающая все районы Земли, где вода находится в замороженном состоянии, такие как ледники, ледяные щиты, снежный покров и вечная мерзлота, играет важную роль в регулировании климата планеты, поддержании функционирования экосистем и обеспечении жизнедеятельности человека. Охватывая обширные полярные и высокогорные регионы, криосфера служит жизненно важным источником пресной воды, влияет на циркуляцию атмосферы и служит чувствительным индикатором изменения климата. Поэтому мониторинг криосферы и улучшение нашего понимания её динамики чрезвычайно важны, особенно для регионов, в значительной степени зависящих от таяния снега и ледников в плане водных ресурсов, сельского хозяйства, гидроэнергетики и стабильности региона.

Во многих частях света, особенно в горных регионах, таких как Центральная Азия, ледники и сезонный снежный покров являются важнейшими источниками пресной воды. По данным Иммерзееля и соавт. (Immerzeel et al., 2020), только в регионе Гиндукуш-Гималаи ледники являются источником жизнедеятельности почти 240 миллионов человек, обеспечивая орошение для сельского хозяйства, питьевую воду и выработку гидроэлектроэнергии. По мере потепления климата прогнозируются изменения массы ледников и продолжительности снежного покрова, которые нарушат существующие гидрологические режимы, что приведёт к нехватке воды в долгосрочной перспективе (Huss et al., 2017).

Влияние изменения климата на состояние снежного покрова в регионе

Для понимания долгосрочных последствий изменения климата очень важны сценарии будущих изменений снежного покрова, особенно в таких регионах, как Центральная Азия, где сток от таяния снега может составлять до 80 % общего стока (Armstrong et al., 2019, Kraaijenbrink et al., 2021) и поэтому играет ключевую роль в обеспеченности региона водными ресурсами. Снежный покров действует как естественный резервуар, накапливая осадки в зимние месяцы и постепенно высвобождая их в виде талой воды весной и летом. Этот сезонный сток необходим для сельского хозяйства, гидроэнергетики, снабжения питьевой водой и здоровья экосистем. Однако повышение температуры приводит к изменению динамики накопления и таяния снега, что может иметь серьёзные последствия для состояния водных ресурсов, опасности возникновения стихийных бедствий и экономики региона.

Одна из основных причин, по которой сценарии влияния изменения климата на снежный покров так важны, заключается в том, что они могут помочь предсказать изменения в продолжительности снежного сезона, объёме снега и сроках снеготаяния. Более раннее таяние снега вследствие более тёплой зимы и весны приведёт к уменьшению доступности водных ресурсов в конце года, когда спрос на воду для орошения и потребления человеком зачастую наиболее высок. В некоторых регионах это может привести к серьёзной нехватке воды в критически важный вегетационный период, что скажется на производительности сельского хозяйства и продовольственной безопасности. Центральная Азия, в частности, в значительной степени зависит от таяния снега для нужд своего сельского хозяйства, что делает её весьма уязвимой к этим изменениям.

Сценарии изменения состояния снежного покрова также важны для оценки возможности усиления опасных природных явлений. Быстрое таяние снега, усугубляемое потеплением климата, может вызвать более частые и сильные наводнения, угрожающие инфраструктуре и населённым пунктам низовий. Это особенно актуально для горных регионов, где расход рек снегового питания может резко увеличиваться, вызывая внезапные бурные паводки и повреждая важнейшие объекты инфраструктуры, та-

кие как плотины, мосты и ирригационные системы. Понимание будущих режимов снеготаяния с помощью климатических сценариев поможет разработать системы раннего предупреждения и адаптировать инфраструктуру, с тем чтобы противостоять этим меняющимся рискам.

Кроме того, сценарии изменения снежного покрова имеют решающее значение для управления трансграничными водными ресурсами. Страны Центральной Азии совместно пользуются водными системами, которые берут начало в питаемых снегом вершинах горных хребтов, таких как Тянь-Шань и Памир. Изменения в сроках и объёмах таяния снега могут нарушить существующие соглашения о совместном использовании водных ресурсов и обострить противоречия между странами верховий и низовий. Наличие точных сценариев изменения снежного покрова с климатом позволяет политикам предусматривать эти изменения и разрабатывать стратегии управления водными ресурсами, более адаптивные к будущим условиям.

В целом, сценарии влияния изменения климата на снежный покров дают жизненно важное представление о том, как потепление повлияет на доступность водных ресурсов, риски бедствий и стабильность региона. Они позволяют осуществлять более эффективное планирование и разрабатывать стратегии адаптации, обеспечивая устойчивое управление водными ресурсами и защиту населения от возникающих угроз, связанных с изменением климата.

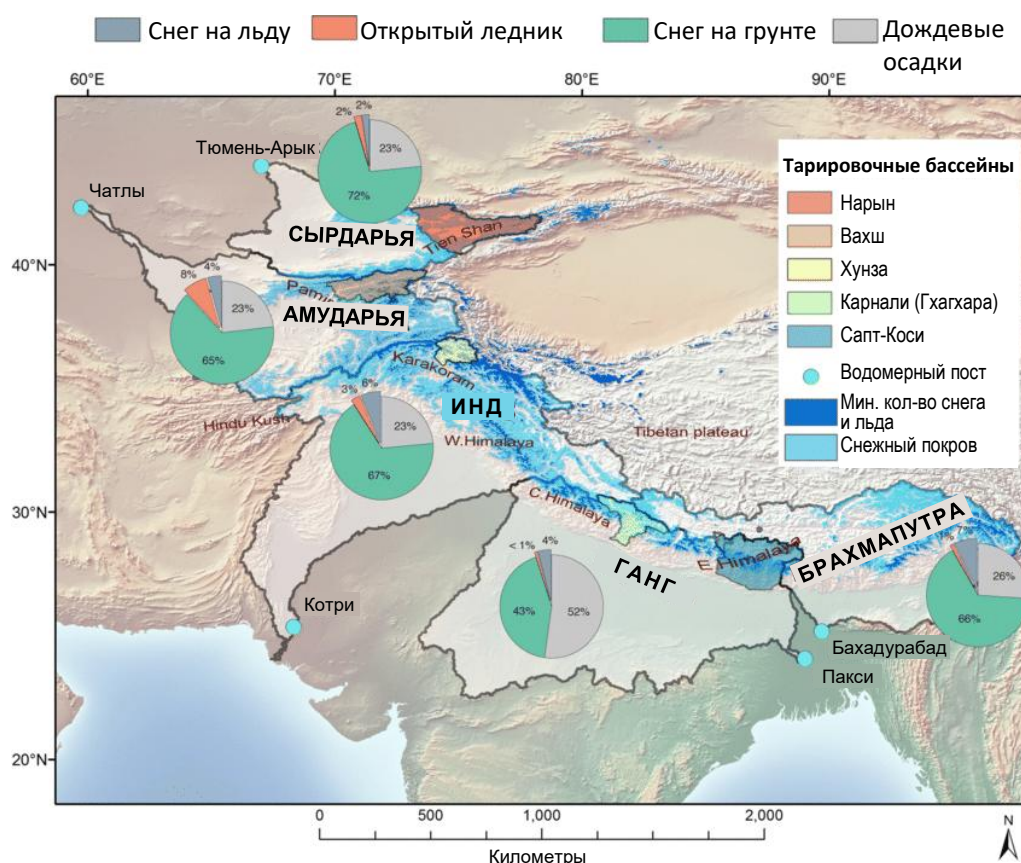


Рисунок 1. Результаты проекта CHARIS продемонстрировали преобладание стока от таяния снега во всех основных бассейнах высокогорной Азии, за исключением Ганга, где преобладает сток от муссонов (Armstrong et al., 2019)

2. Методология

В методологии создания сценариев изменения снежного покрова с климатом в XXI веке в Центральной Азии будет использована цепочка моделей ТороCLIM (Fiddes et al., 2022), объединяющая в себе даунскейлинг климатических процессов, подсеточную пространственную модель и модель снежного покрова. Этот комплексный подход позволяет с высоким разрешением выполнять даунскейлинг как текущих, так и будущих климатических данных с учётом сложного рельефа региона. Цепочка моделей ТороCLIM особенно подходит для горных и разнородных в топографическом отношении регионов, таких как Центральная Азия, где локальные климатические эффекты имеют решающее значение для точности прогнозов.

Шаг 1: ТороSUB — топографическая кластеризация

На первом этапе используется ТороSUB — модель, которая позволяет сгруппировать ландшафты в репрезентативные единицы на основе ключевых топографических параметров, таких как высота, уклон, экспозиция и коэффициент обзора неба (Fiddes & Gruber, 2012). Сложный рельеф Центральной Азии, особенно высокогорных районов, требует такой кластеризации для упрощения ландшафта при сохранении важнейших параметров изменчивости.

Группируя районы со схожими топографическими особенностями, ТороSUB позволяет снизить вычислительную нагрузку, делая возможным проведение моделирования с высоким разрешением на обширных территориях. Эти топографические кластеры послужат основой для даунскейлинга климатических данных на следующих этапах.

Шаг 2: ТороSCALE — даунскейлинг текущих климатических данных

После создания топографических кластеров применяется модель ТороSCALE для даунскейлинга исторических и текущих климатических данных. На этом этапе используются данные реанализа ERA5, которые обеспечивают высококачественные атмосферные переменные для текущих климатических условий. ТороSCALE корректирует эти данные низкого разрешения, чтобы лучше представить локальные климатические условия путём учёта топографических эффектов, таких как высота над уровнем моря, экспозиция и вариации, вызванные рельефом местности (Fiddes & Gruber, 2014).

Для Центральной Азии, где на местные климатические условия сильно влияют горные хребты, такие как Памир, Тянь-Шань и Алтай, такой даунскейлинг имеет решающее значение для обеспечения точного отражения показателей температуры, осадков и ветра. Полученные в результате данные высокого разрешения представляют базисный уровень текущих климатических условий, что позволяет проводить статистический даунскейлинг прогнозов на будущее.

Шаг 3: ТороCLIM — квантильное картирование и корректировка погрешностей сценариев будущих изменений

На этом шаге для даунскейлинга сценариев будущих изменений климата применяется комплексная модель ТороCLIM (Fiddes et al., 2022). ТороCLIM берёт данные глобальной климатической модели CMIP6, имеющие низкое разрешение, и осуществляет их даунскейлинг, используя ранее созданные базисные данные ТороSCALE. Мы используем регулярно применяемую методику статистического даунскейлинга — квантильное картирование, которое позволяет корректировать погрешности в прогнозах будущих из-

менений климата, приводя их в соответствие с наблюдаемыми распределениями разукрупнённых результатов реанализа ERA5 (Fiddes et al., 2022), который мы рассматриваем как наилучшее предположение о текущем состоянии климата.

Квантильное картирование гарантирует, что данные по будущим изменениям климата, особенно связанные с динамикой снежного покрова, такие как температура воздуха и количество осадков, будут отражать более реалистичные условия для Центральной Азии. Это особенно важно, учитывая погрешности, присущие глобальным климатическим моделям, когда они применяются к регионам со сложным рельефом. Откорректированные прогнозы создаются для различных сценариев общих социально-экономических путей (SSP), включая SSP2-4.5 (умеренные выбросы) и SSP5-8.5 (высокие выбросы), чтобы оценить ряд будущих траекторий изменения климата. Калибровочный период, представляющий собой период перекрытия данных прогонов климатической модели для прошлых периодов и разукрупнённых данных виртуальных наблюдений ERA5 (наилучшее предположение о реальности), охватывает 1995–2015 годы.

Шаг 4: моделирование снежного покрова и генерация выходных данных

На основе откорректированных и разукрупнённых данных по будущим изменениям климата TороCLIM запускается модель снежных покровов FSM (Essery, 2015) для моделирования ключевых переменных, таких как водный эквивалент снега, толщина снежного покрова и сток снеготаяния. Эти модели помогут оценить влияние изменения климата на снежный покров в Центральной Азии в течение XXI века. Например, модельная цепочка спрогнозирует изменения в сроках сезонного снеготаяния, продолжительности снежного покрова и общем объёме снега при различных сценариях потепления. Результаты будут представлены для различных временных периодов — текущего (2000–2020 гг.) периода, ближайшего (2040–2060 гг.) и отдалённого (2080–2100 гг.) будущего, с прогнозами в высоком пространственном разрешении. Эти результаты будут включать подробные карты и временные ряды, отражающие изменение состояния снежного покрова по всей Центральной Азии.

3. Данные

Текущие климатические данные ERA5

Набор данных ERA5 (Hersbach et al., 2020) — это глобальный набор данных атмосферного реанализа, подготовленный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) в рамках программы наблюдений за климатом Copernicus. Он предоставляет почасовые данные высокого разрешения по различным климатическим переменным атмосферы, суши и океана, начиная с 1950 года, что делает его одним из наиболее полных и широко используемых наборов данных для изучения исторических климатических и погодных закономерностей. ERA5 включает данные о температуре, осадках, скорости ветра, влажности, приземном давлении и солнечной радиации, в том числе, с пространственным разрешением около 31 км по всему миру. Благодаря сочетанию огромного количества данных наблюдений с передовыми моделями прогнозирования погоды, ERA5 обеспечивает последовательную и точную реконструкцию погодных и климатических условий прошлого. Этот набор данных имеет решающее значение для климатических исследований, изучения влияния климата и осуществления долгосрочного мониторинга, а также для работ по даунскейлингу с целью получения локализованных климатических данных для конкретных регионов, особенно со сложным рельефом. Данная методология использует модель энергетического баланса снежного покрова, поэтому необходимы почасовые переменные, связанные с массо- и энергообменом.

Данные по будущим изменения климата

Набор данных CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 — Фаза 6 проекта взаимного сравнения связанных моделей) представляет собой комплексную коллекцию расчётов климатических моделей, которые составляют основу Шестого оценочного доклада МГЭИК (ОД6) и более широких исследований климата. CMIP6 — это последняя итерация серии CMIP, призванная улучшить понимание динамики климата, прогнозов на будущее и потенциального воздействия различных сценариев выбросов. В этом наборе участвуют климатические модели, разработанные исследовательскими институтами со всего мира, с моделированием от доиндустриальной эпохи до различных прогнозов на будущее (часто до 2100 года и далее). В CMIP6 рассматривается широкий спектр сценариев, включая сценарии, основанные на общих социально-экономических путях (SSP), которые включают в себя различные предположения о траекториях глобального социально-экономического развития, технологий и политических решений. Набор данных позволяет получить критически важные сведения о таких переменных, как температура воздуха, количество осадков, состав атмосферы и многое другое, что делает его ценным инструментом для изучения изменения климата, разработки стратегий адаптации и мер смягчения последствий в различных масштабах и регионах. В данном исследовании мы используем следующие четыре сценария общих социально-экономических путей (SSP) — SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5, представляющие полный спектр сценариев развития и выбросов парниковых газов, охваченных CMIP6 (рисунок 4). Выбор глобальной климатической модели соответствует структуре ISIMIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project — Проект взаимного сравнения моделей межсекторального воздействия) и включает UKESM1.0-LL (Seller et al., 2019), IPSL CM6A-LR (Boucher et al., 2018), MRI-ESM2-0 (Yukimoto et al., 2019) и GFDL-ESM4 (Krasting et al., 2018). Модели были выбраны таким образом, чтобы отразить диапазон неопределённости прогнозов на будущее, особенно в отношении температуры воздуха и количества осадков — для относительно тёплых, холодных, сухих и влажных климатических условий (рисунки 2 и 3).

Таблица 1. Климатические модели и сценарии, использованные в данном исследовании. Все сценарии рассчитаны на период 2015–2100 гг., исторические — на период 1970–2015 гг.

Модель	Исторические показатели	SSP1-RCP2.6	SSP2-RCP4.5	SSP3-RCP7.0	SSP5-RCP8.5
UKESM1.0-LL	x	x	x	x	x
GFDL-ESM2M	x	x	x	x	x
IPSL-CM5A-LR	x	x	x	x	x
MRI-ESM2-0	x	x	x	x	x

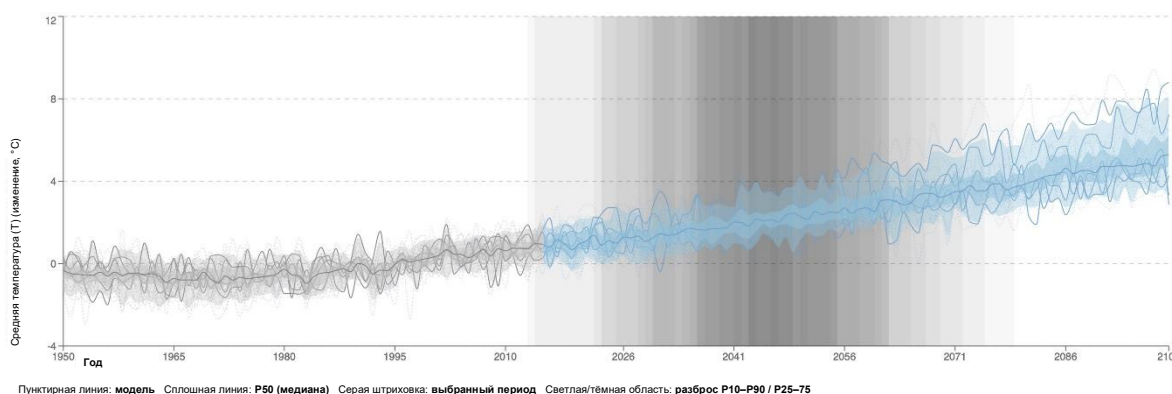


Рисунок 2. CMIP6 — изменение средней температуры воздуха (T) в °C — потепление на 2 °C по SSP3-7.0 (относительно 1981–2010 гг.) — годовое (30 моделей). Регион: Амударья. Жирные линии выделяют использованные в данном исследовании модели из 30-модельного ансамбля, демонстрируя репрезентативность этого подмножества ансамбля.
(Сгенерировано на <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)

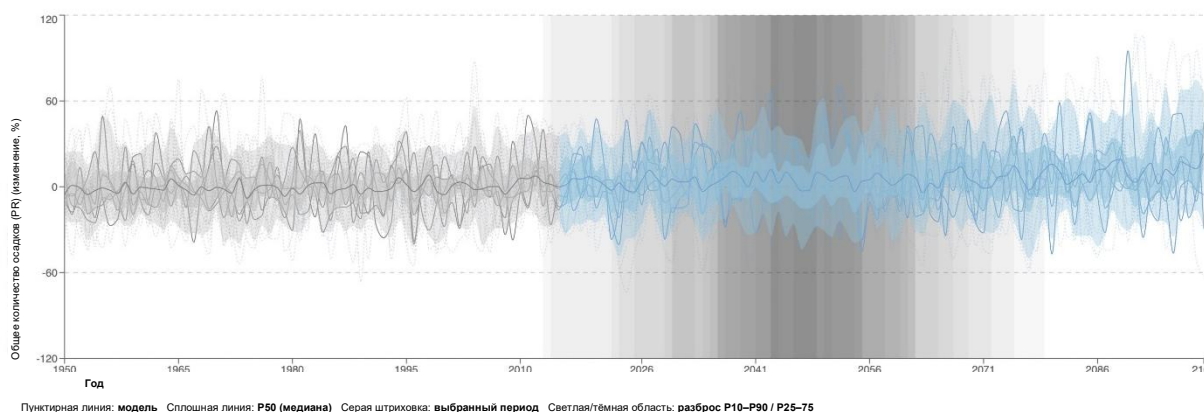


Рисунок 3. CMIP6 — изменение общего количества осадков (PR) в % — потепление на 2 °C по SSP3-7.0 (относительно 1981–2010 гг.) — годовое (28 моделей). Регион: Амударья. Жирные линии выделяют использованные в данном исследовании модели из 30-модельного ансамбля, демонстрируя репрезентативность этого подмножества ансамбля.
(Сгенерировано на <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)

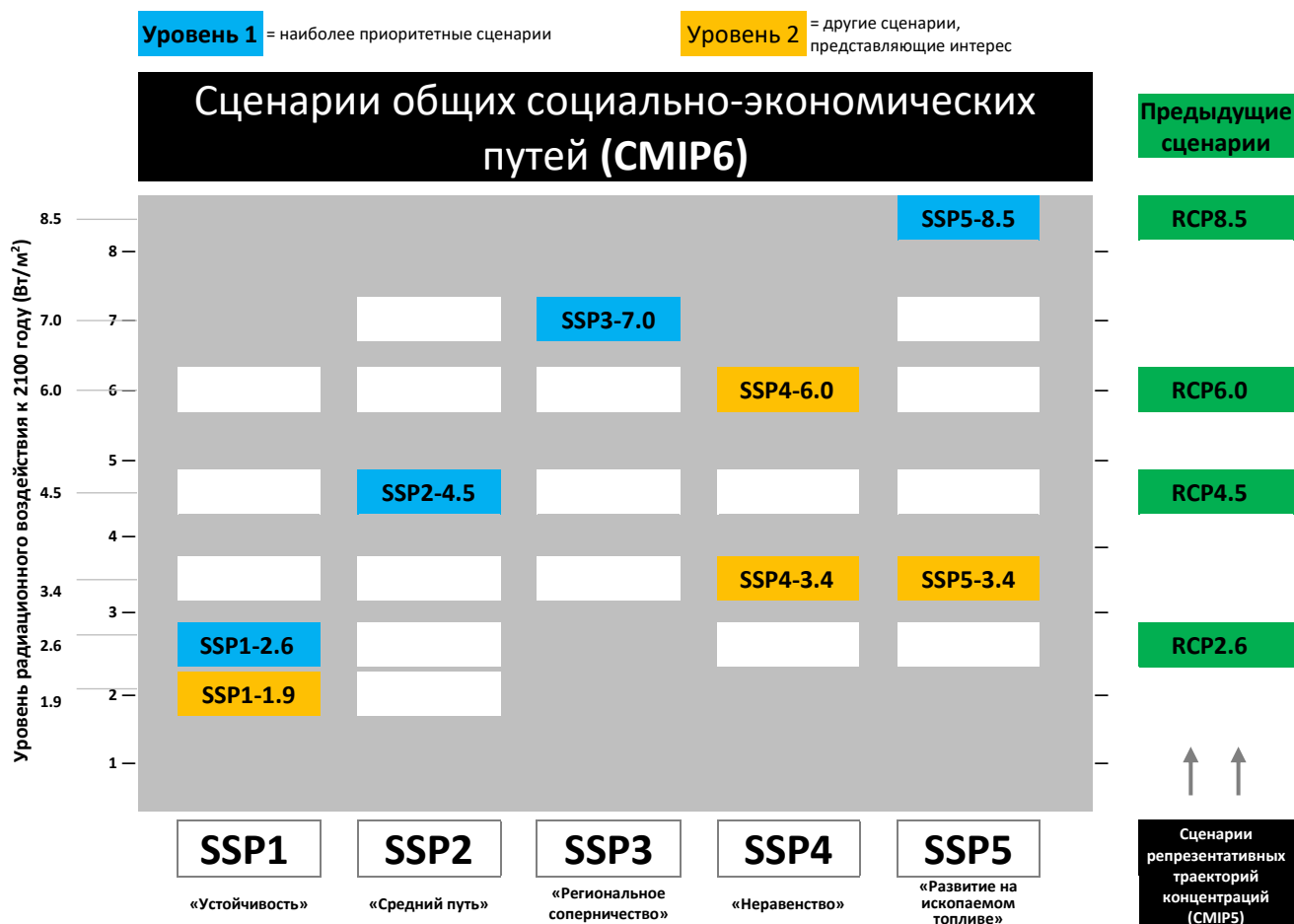


Рисунок 4. Сценарии общих социально-экономических путей и комбинации радиационного воздействия к 2100 году, использованные в данном исследовании (источник: <https://climate-scenarios.canada.ca/>)

Данные о рельефе

Данные радиолокационной топографической миссии шаттла (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) — это глобальный набор данных, который обеспечивает цифровые модели рельефа земной поверхности с высоким разрешением. Данные SRTM, собранные радиолокационными приборами космического корабля «Индевор» в ходе 11-дневного полёта в феврале 2000 года, охватывают почти 80 % поверхности Земли, включая большую часть населённого мира между 56° ю. ш. и 60° с. ш. SRTM предоставляет данные о рельефе земной суши с разрешением 30 метров (1 угловая секунда) разных регионов по всему миру. Шаг данных в наборе данных изменяется до 500 м и затем этот набор данных используется для получения параметров уклона, экспозиции и коэффициента обзора неба.

Данные о ледниках

Контуры ледников получены из Рэндольфского кадастра ледников (Randolph Glacier Inventory, RGI) — глобального комплексного набора данных, содержащего подробную информацию о контурах и особенностях ледников за пределами Гренландского и Антарктического ледяных щитов. Разработанный научным сообществом в рамках инициативы «Глобальные измерения наземных льдов из космоса» (Global Land Ice Measurements from Space, GLIMS), RGI широко используется в климатических и гидрологических исследованиях для мониторинга изменений ледников под воздействием потепления климата. В данном исследовании контуры ледников будут использоваться для маскировки районов оледенения с целью выделения областей сезонного снега.

4. Реализация модели

Цепочка моделей по изучению воздействия изменения климата

На рисунке 5 показана цепочка моделей, используемых в данном отчёте, начиная с первичных входных данных слева. Процесс включает предварительную обработку данных о поверхности, даунскейлинг климатических данных и коррекцию погрешностей, а также моделирование снежного покрова, что в конечном итоге приводит к получению итоговых выходных данных.

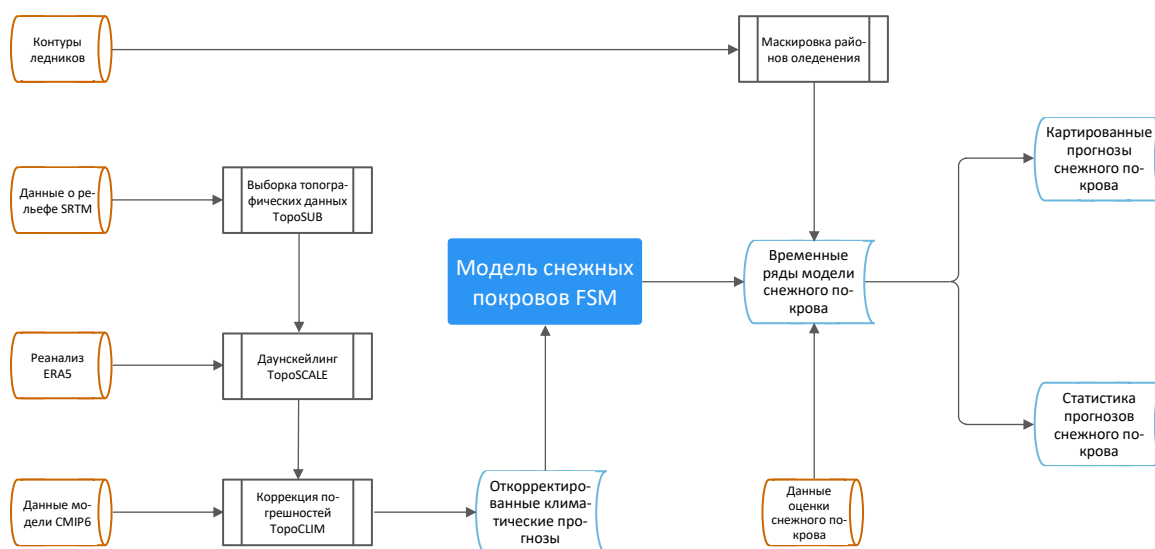


Рисунок 5. Схема цепочки моделей оценки воздействия изменения климата, реализованная в данном отчёте

Периоды оценки воздействия изменения климата

Для оценки воздействия изменения климата мы определили три периода моделирования: 1) исторический референтный период (*HIST*), **1981–2010 гг.**; 2) период сценария ближайшего будущего (*NEAR*), **2021–2040 гг.**; и, наконец, 3) период сценария отдалённого будущего (*FAR*) **2081–2100 гг.** Эти периоды соответствуют периодам, определённым в ОД6 МГЭИК <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-4/>. Таким образом, оценка воздействия (*Impact*) в отдалённом будущем может быть получена следующим образом:

$$Impact = FAR - HIST$$

Метеорологические переменные

Модель снежных покровов FSM управляется набором метеорологических переменных, разукрупнённых с помощью TopoPyScale, осадки также предварительно разделены на компоненты дождя и снега, и все переменные представлены с постоянным темпоральным разрешением 1Н (таблица 2). Эти исходные данные необходимы для моделирования накопления снега, энергообмена, таяния и стока.

Таблица 2. Метеорологические переменные, используемые для управления моделью FSM.

Переменная	Ед. изм.	Описание
Tair	°C	Температура приземного воздуха
Sf	кг/(м ² ·с)	Интенсивность снеговых (твёрдых) осадков в разбивке ToroPyScale
Rf	кг/(м ² ·с)	Интенсивность дождевых (жидких) осадков в разбивке ToroPyScale
SW	Вт/м ²	Нисходящая коротковолновая радиация
LW	Вт/м ²	Нисходящая длинноволновая радиация
WS	м/с	Скорость ветра на стандартной высоте (обычно 10 м)
RH	%	Относительная влажность
Psurf	Па	Давление воздуха на поверхности (опционально, используется, если требуется по конфигурации)

Моделируемые переменные

В таблице 3 представлены основные моделируемые переменные, использованные в исследовании. К ним относятся параметры, связанные со снежным покровом, такие как **толщина снежного покрова (snd)** и **водный эквивалент снега (SWE)**, которые важны для понимания динамики накопления и таяния снега. Кроме того, **альбедо (alb)** представляет отражательную способность поверхности и используется в данном исследовании в качестве косвенного показателя наличия снежного покрова, а параметр **сток (Rof)** количественно характеризует общий снеговой и дождевой сток воды. Набор данных также включает **температуру приземного воздуха (GST)**, что даёт представление об энергетическом балансе и тепловом режиме поверхности земли.

Таблица 3. Основные моделируемые переменные, использованные в исследовании

Переменная	Ед. изм.	Описание
alb	-	Эффективное альбедо
Rof	кг /м ²	Суммарный сток со снега (включая дождевой)
snd	м	Средняя толщина снежного покрова
SWE	кг/м ²	Средний водный эквивалент снега
GST	°C	Средняя температура приземного воздуха

5. Разработка климатообразующих факторов CMIP6

Основополагающей задачей создания сценариев снежного покрова является получение наборов данных метеорологического воздействия высокого разрешения. Для моделирования снежного покрова требуется полный набор метеорологических переменных, как показано в таблице 2. Затем мы создали подмножество пространственных сеток с разрешением 1 км в качестве дополнительных продуктов для использования моделями температурных индексов. К ним относятся: суточная сумма осадков (PSUM), среднесуточная температура воздуха (TAMEAN), минимальная суточная температура воздуха (TAMIN) и максимальная суточная температура воздуха (TAMAX). Основное применение этих наборов факторов воздействия заключается в управлении гидрологической моделью SPHY в рамках гидрологического компонента деятельности ГЭФ, а также в качестве самостоятельного продукта в рамках компонента изучения метеорологических факторов. Набор данных достаточно большой и состоит из четырёх моделей и четырёх сценариев (шестнадцать отдельных цепочек моделей), перечисленных в таблице 4, и составляет около 5 ТБ данных (1 985 600 файлов NetCDF).

Для создания этих наборов данных метеорологического воздействия высокого разрешения необходимо было провести даунскейлинг результатов климатических моделей CMIP6. Глобальные климатические модели (модели общей циркуляции), такие как CMIP6, работают с низким пространственным разрешением (обычно 100–200 км), недостаточным для отражения сложного рельефа и микроклиматических условий, характерных для горных регионов. Даунскейлинг — как динамический, так и статистический — устраняет этот недостаток, преобразуя климатические прогнозы низкого разрешения в данные высокого разрешения, которые отражают местные влияния рельефа, такие как высота, уклон, экспозиция. Это особенно важно для горных районов, где градиенты осадков и температуры воздуха могут резко меняться на коротких расстояниях, оказывая существенное влияние на накопление снега, динамику таяния и гидрологические процессы. Таким образом, разукрупнённые данные высокого разрешения позволяют более точно моделировать водообеспеченность, сток и воздействие климата в этих сложных и часто критически зависимых от водных ресурсов районах.

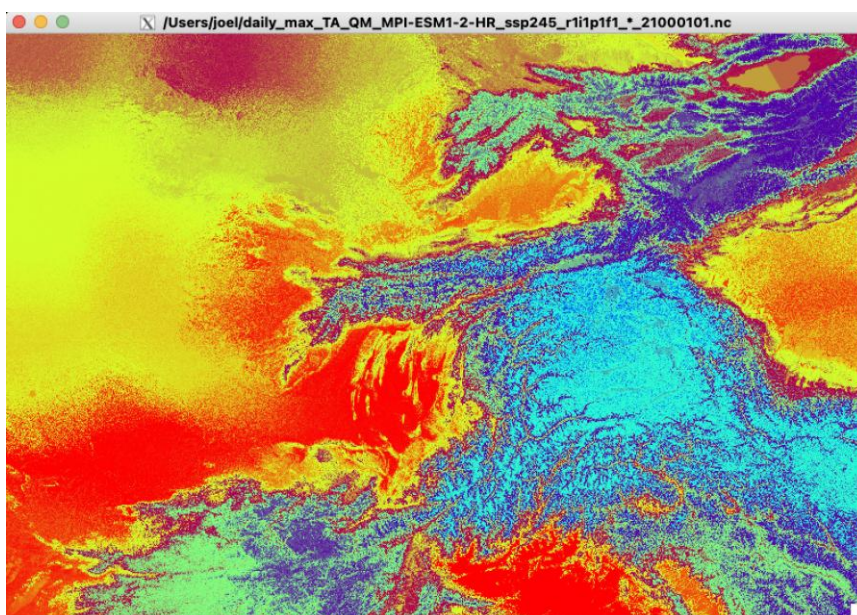


Рисунок 6. Пример выполнения одного параметра из одной цепочки моделей для одного дня:
TAMAX для MPI-ESM1-2-HR и сценария ssp245 на 1 января 2100 года

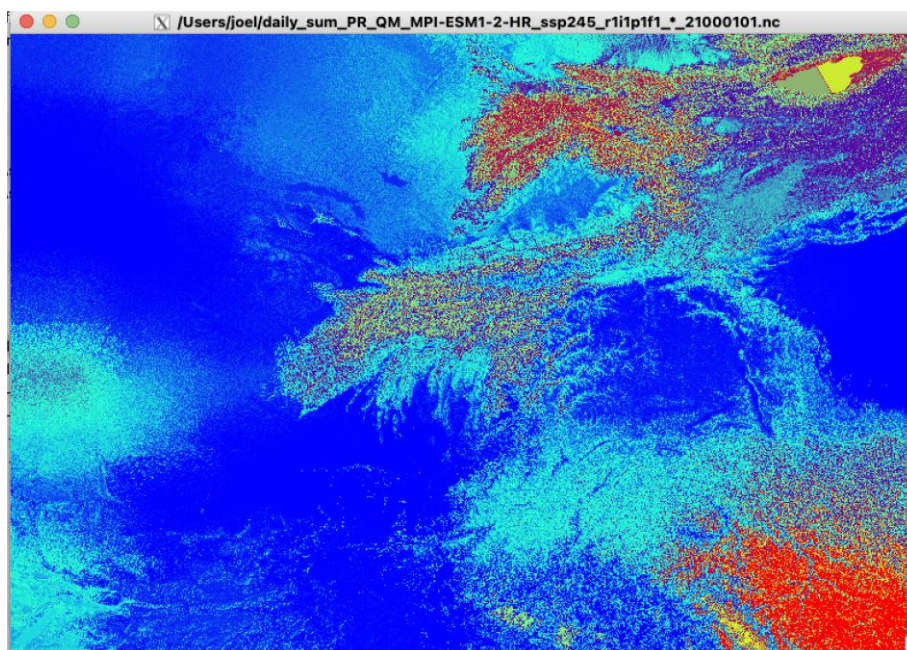


Рисунок 7. Пример выполнения одного параметра из одной цепочки моделей для одного дня:
PSUM для MPI-ESM1-2-HR и сценария ssp245 на 1 января 2100 года

Таблица 4. Цепочки моделей CMIP6, разработанные в рамках данного отчёта

Модель	Сценарий	PSUM	TAMEAN	TAMIN	TAMAX
GFDL	ssp126	x	x	x	x
	ssp245	x	x	x	x
	ssp370	x	x	x	x
	ssp585	x	x	x	x
IPSL	ssp126	x	x	x	x
	ssp245	x	x	x	x
	ssp370	x	x	x	x
	ssp585	x	x	x	x
UKESM	ssp126	x	x	x	x
	ssp245	x	x	x	x
	ssp370	x	x	x	x
	ssp585	x	x	x	x
MPI	ssp126	x	x	x	x
	ssp245	x	x	x	x
	ssp370	x	x	x	x
	ssp585	x	x	x	x

6. Результаты выполнения сценария снежного покрова

Модельные области

Центральная Азия разделена на две отдельные модельные области: 1) высокогорная Центральная Азия (НМСА), которая охватывает основные хребты Гиндукуша, Памира и Тянь-Шаня; и 2) Казахстан (KAZ), которая частично охватывает Тянь-Шань, но основное внимание уделяется обширной степи Казахстана. В данном отчёте представлен анализ для области НМСА из-за задержек в получении данных по воздействию от ECMWF в связи с систематическими проблемами в ECMWF в течение 4 квартала 2024 года (см. обсуждения на форуме CDS). В любом случае, имеет смысл использовать меньшую область НМСА для проведения окончательного анализа, который будет являться Вкладом 3.

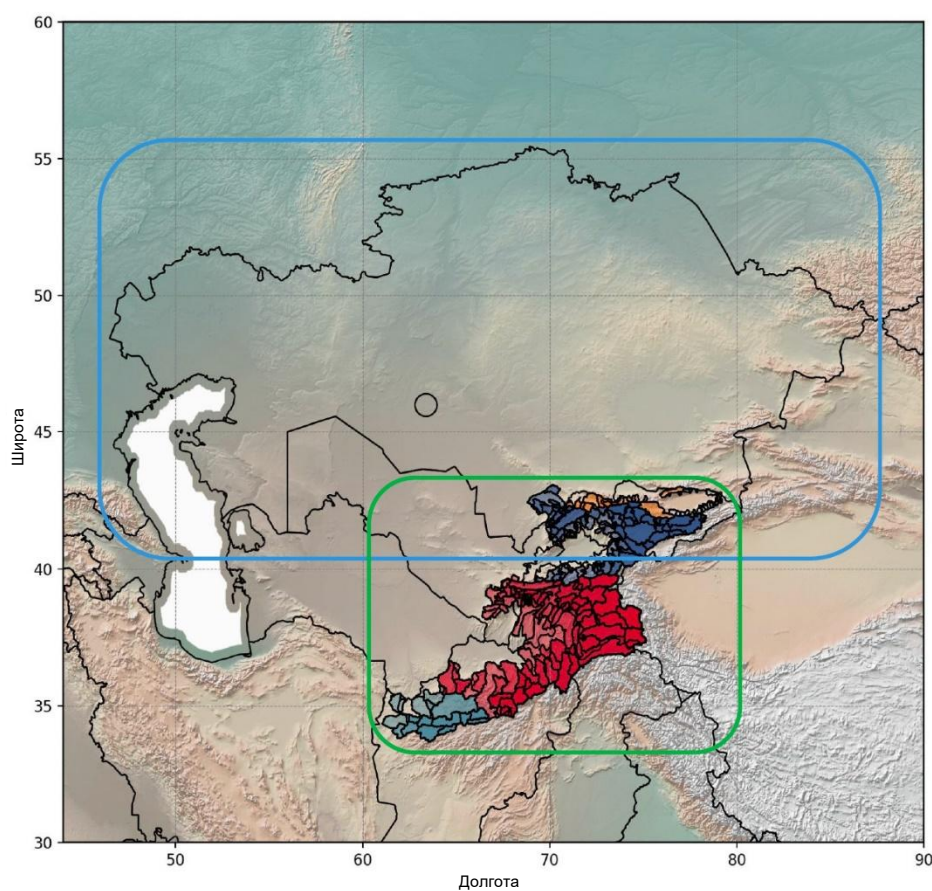


Рисунок 8. Обзорная карта двух областей моделирования: 1) высокогорная Центральная Азия (НМСА); 2) Казахстан (KAZ)

Модельная область «высокогорная Центральная Азия»

Регион высокогорной Центральной Азии охватывает труднопроходимые территории Северного Афганистана, Таджикистана, Кыргызстана и восточные горы Узбекистана. Этот регион характеризуется сложным рельефом, большими высотами и значительным сезонным накоплением снега, что делает его важнейшим источником водных ресурсов для населения низовий. Регион включает ключевые гидрологические бассейны, такие как Амударья, Сырдарья, Иссык-Куль, Чу-Талас и Харируд, которые питаются

в основном за счёт таяния снега и ледниковых отложений. Эти бассейны обеспечивают нужды сельского хозяйства, гидроэнергетики и снабжения питьевой водой миллионов людей в Центральной Азии. Учитывая зависимость региона от сезонного снежного покрова, понимание будущей динамики снежного покрова при различных сценариях изменения климата имеет решающее значение для планирования водных ресурсов и выработки стратегий адаптации. На рисунке 7 показаны пять бассейнов и 221 водосбор притоков, использованные в данном отчёте и полученные из работы Марти и соавт. (Marti et al., 2023).

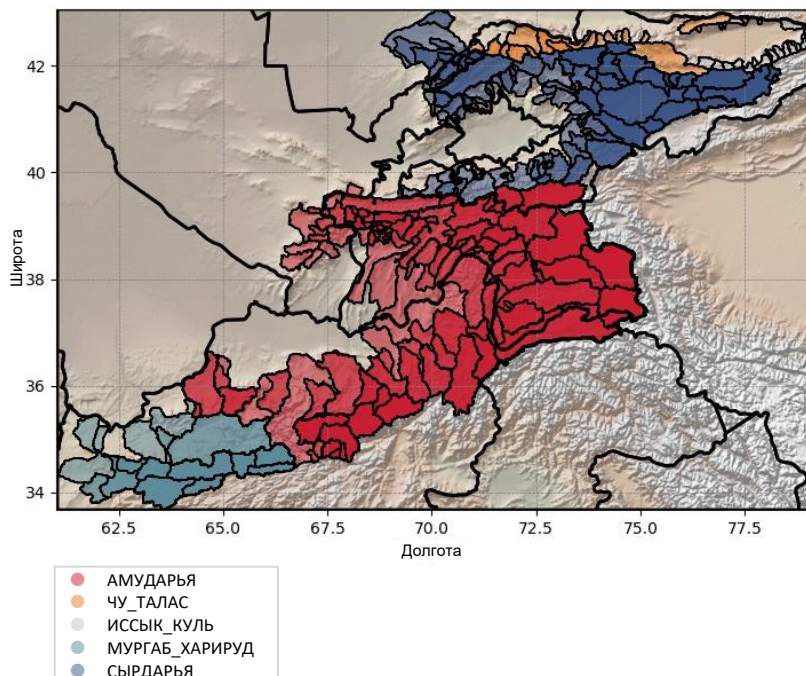


Рисунок 9. Модельная область «высокогорная Центральная Азия»

Сценарии CMIP6 для основных тенденций и климатических условий

Климатические прогнозы CMIP6 дают важное представление о долгосрочных тенденциях изменения температуры воздуха (Т), количества осадков (Р) и осадков в виде снега в высокогорной Центральной Азии и Казахстане. Используя ансамбль моделей, эти прогнозы позволяют оценить сезонные колебания в разбивке по сезонам сентябрь — ноябрь, декабрь — февраль и март — май. Такая разбивка по сезонам крайне важна для понимания изменений в характере накопления и таяния снега, которые непосредственно влияют на гидрологические режимы региона. В анализе рассматриваются два ключевых сценария общих социально-экономических путей: SSP2-4.5, представляющий сценарий умеренных выбросов, и SSP5-8.5, отражающий траекторию высоких выбросов. Эти крупномасштабные климатические воздействия обеспечивают контекст климатических условий данного анализа и, следовательно, выделяют общие тенденции, которые мы подробно исследуем в данном отчёте.

Основные наблюдения:

- потепление во все сезоны, на всех высотах и по всем сценариям. Более сильное потепление зимой (декабрь — февраль) на больших высотах и в высоких широтах;
- неопределённость в количестве осадков, увеличение количества осадков зимой (декабрь — февраль), особенно в Северном Тянь-Шане, Тибетском нагорье и Восточном Памире;
- уменьшение количества осадков в виде снега во всех регионах в межсезонье осенью (сентябрь — ноябрь) и весной (март — май). Увеличение количества снега зимой (декабрь — февраль) в высоких широтах, Восточный Памир, Северный Тянь-Шань;
- очень сильное сокращение весенних осадков в виде снега (март — май) в сценарии SSP5-8.5 с высоким уровнем выбросов.

Изменение средней многолетней температуры воздуха (2081–2100 гг. относительно 1981–2010 гг.)

Среднее по ансамблю (34 модели)

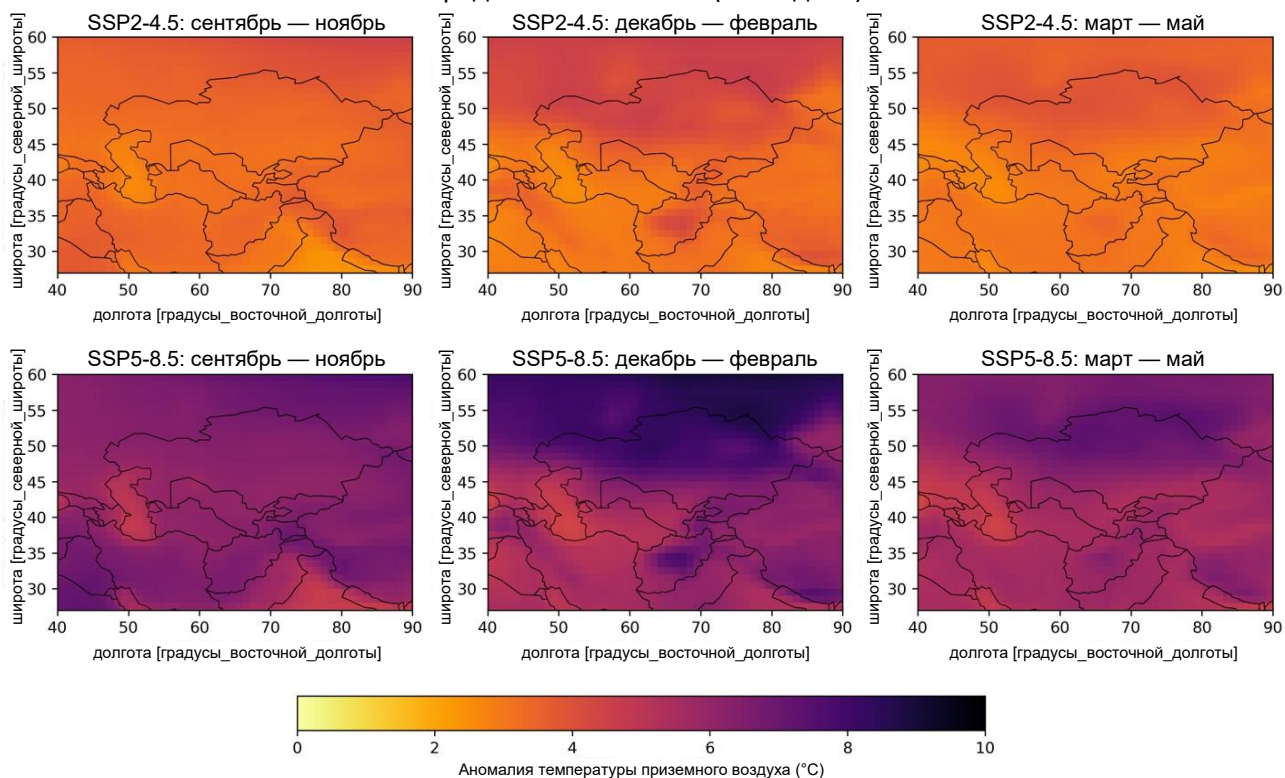


Рисунок 10. Климатические прогнозы СМIP6 для аномалии температуры приземного воздуха над модельными областями для сценариев умеренных (SSP2-4.5) и высоких (SSP5-8.5) выбросов для трёх сезонов (сентябрь — ноябрь, декабрь — февраль, март — май)

Многолетнее изменение количества осадков (2081–2100 гг. относительно 1981–2010 гг.)

Среднее по ансамблю (33 модели)

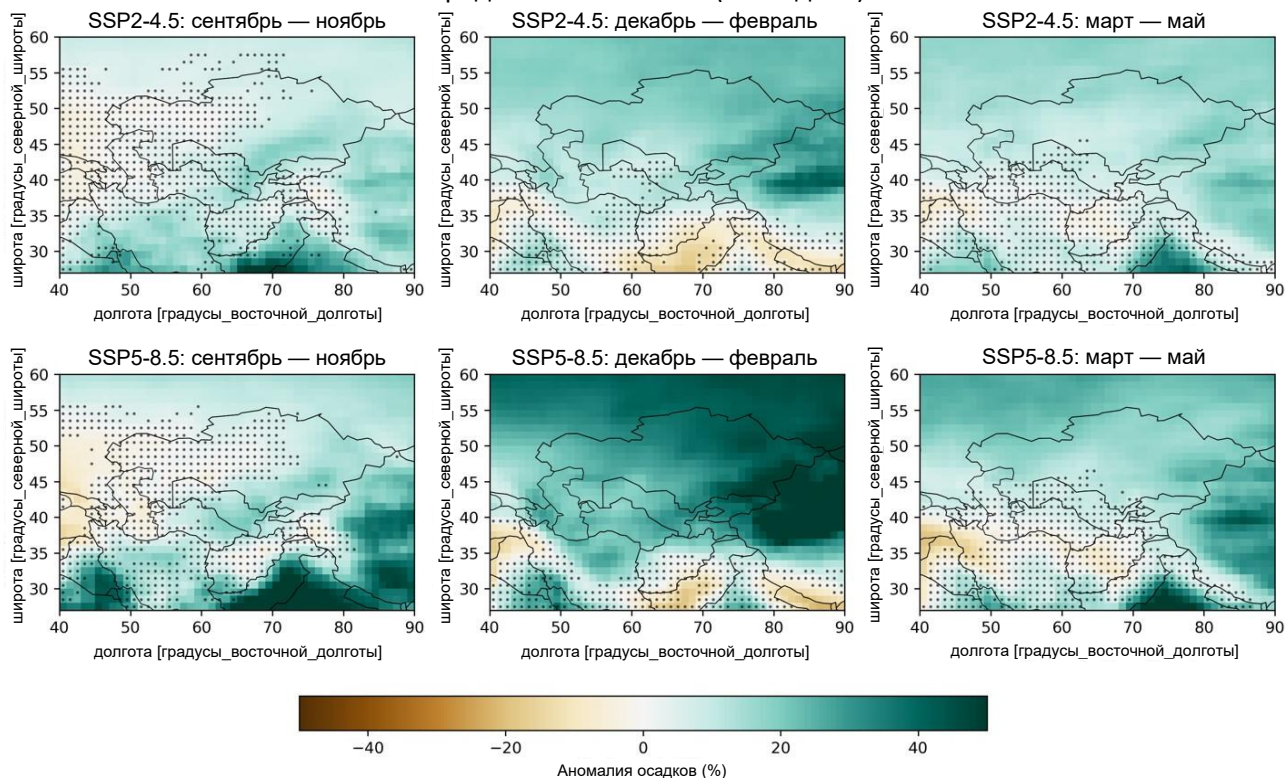


Рисунок 11. Климатические прогнозы CMIP6 для аномалии осадков над модельными областями для сценариев умеренных (SSP2-4.5) и высоких (SSP5-8.5) выбросов для трёх сезонов (сентябрь — ноябрь, декабрь — февраль, март — май)

Многолетние изменения в количестве осадков в виде снега (2081–2100 гг. относительно 1981–2010 гг.)

Среднее по ансамблю (29 моделей)

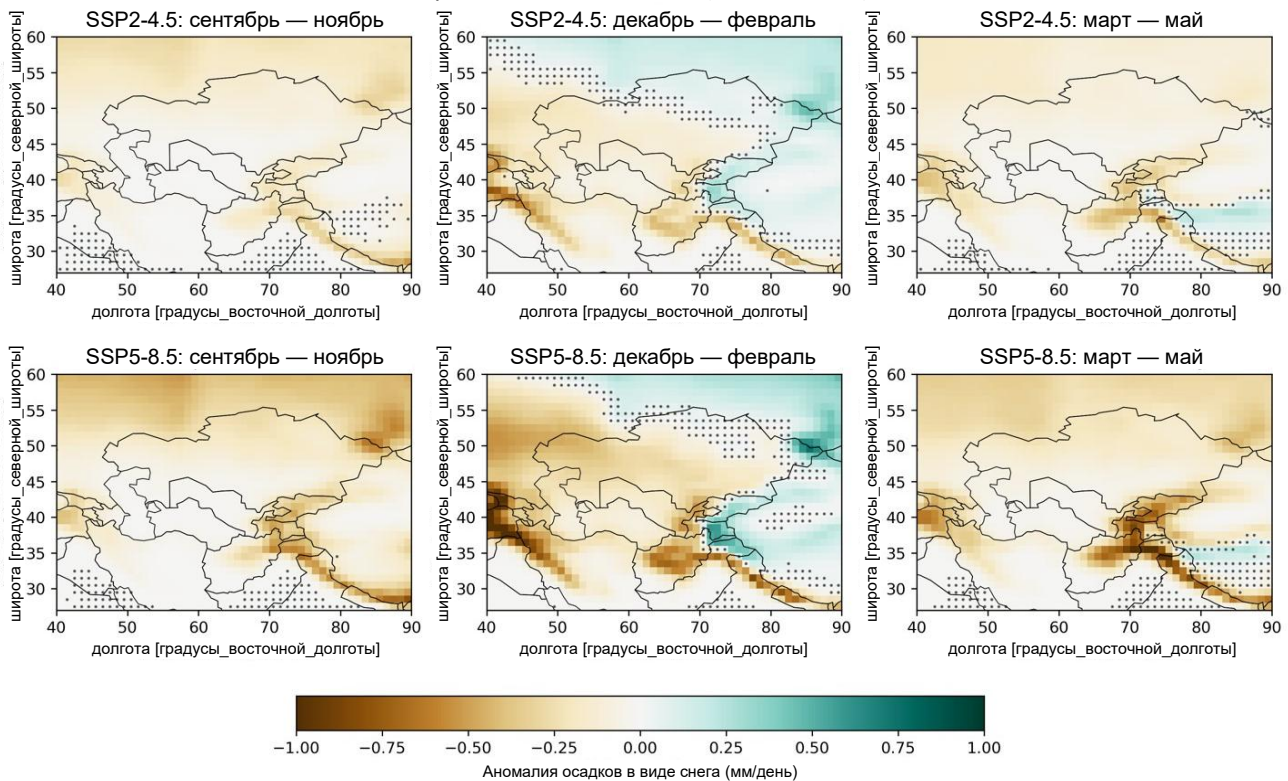


Рисунок 12. Климатические прогнозы CMIP6 для осадков в виде снега над модельными областями для сценариев умеренных (SSP2-4.5) и высоких (SSP5-8.5) выбросов для трёх сезонов (сентябрь — ноябрь, декабрь — февраль, март — май)

Временные ряды для всего региона

Цель данного раздела — показать консолидированные ключевые результаты временных рядов для всего региона. На рисунке 11 представлена эволюция климатических воздействий в XXI веке для набора из пяти графиков временных рядов, показывающих среднегодовые значения различных переменных, связанных со снежным покровом и климатом, для всего региона HMCA за период 1981–2100 гг. Исторический период (1981–2015 гг.) показан чёрным цветом, а прогнозы на будущее в рамках различных сценариев общих социально-экономических путей — SSP126, SSP245, SSP370 и SSP585 — представлены разными цветами. Результаты представляют собой среднегодовые значения, сглаженные за 10-летний период, чтобы подчеркнуть долгосрочные тенденции.

Основные наблюдения:

- продолжающееся потепление температуры приземного воздуха (GST) в течение столетия со стабилизацией в середине века только в сценарии SSP1-2.6 с наименьшими выбросами. Порог потепления на 4 градуса к концу столетия превышен в сценариях с самыми высокими выбросами;
- уменьшение запаса воды в снежном покрове (SWE) и толщины снежного покрова (snd) во всех сценариях, с более значительным уменьшением в сценариях с более высокими выбросами. Однако на региональном уровне некоторые субтенденции маскируются, например, увеличение зимних осадков (в виде снега) на больших высотах в некоторых северных и восточных районах;
- снижение альбедо из-за уменьшения площади снежного покрова в целом;
- сток колеблется, но показывает некоторое увеличение в целом из-за увеличения количества зимних осадков в некоторых районах. Тенденции к снижению стока будут выявлены в ходе следующего анализа.

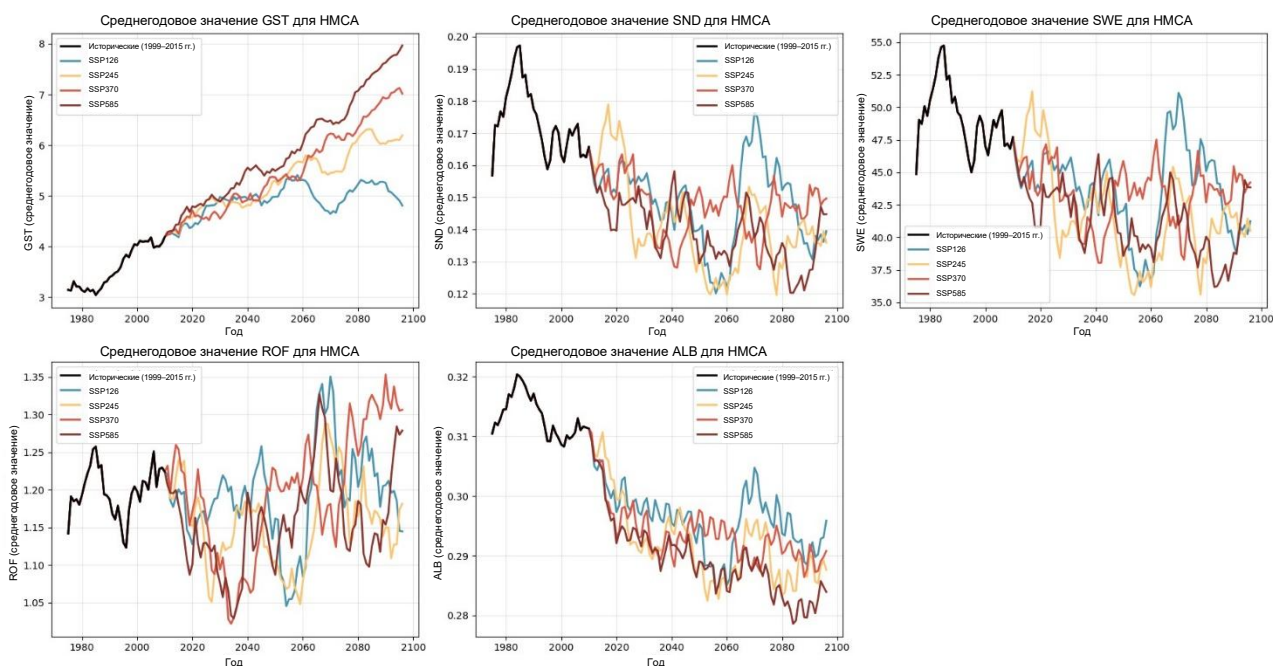


Рисунок 13. Графики временных рядов всех четырёх сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5. Параметры представляют собой средние значения по всей модельной области

Графики сезонности

В данном анализе рассматривается влияние изменения климата на сезонность основных выходных переменных — водного эквивалента снега (SWE), толщины снежного покрова (snd), альбедо (alb), температуры приземного воздуха (GST) и стока (Rof) — для периода отдалённого будущего (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений за каждый период, охватывающий полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года). Влияние изменения климата дополнительно дифференцировано по высотным поясам и гидрологическим бассейнам, что позволяет получить представление о региональных изменениях сезонности при различных будущих климатических условиях.

Основные наблюдения:

- температура приземного воздуха (GST) повышается во всех сценариях, сезонах, высотах и бассейнах. Наблюдается сезонная зависимость потепления: зимой (декабрь — февраль) и весной (март — май) значения выше, чем летом (июнь — август) или осенью (сентябрь — ноябрь). Этот вывод согласуется с сезонными тенденциями, прослеживаемыми в изменении температуры приземного воздуха по CMIP6;
- уменьшение запаса воды в снежном покрове (SWE) во всех сценариях, на всех высотах и во всех районах;
- чаще происходит более ранняя абляция снежного покрова весной, чем задержка начала накопления зимой;
- наибольшие значения запасы воды в снежном покрове в регионе наблюдаются на высотах 3000–4000 м;
- основная часть стока формируется выше 2000 м во всех районах;
- увеличение стока на самых больших высотах (5000 м и выше) по SSP5-8.5, связанное с увеличением количества зимних осадков;
- сокращение снежного покрова ниже 2000 м сильно выражено во всех сценариях, и практически полное его отсутствие в сценарии самых высоких выбросов;

- пики снеготаяния в течение сезона начинаются и заканчиваются раньше, причём сила эффекта увеличивается в зависимости от сценария выбросов, вплоть до месяца в сценариях самых больших выбросов;
- снижение альбедо (представляющего снежный покров) очень сильно выражено ниже 2000 м в бассейне реки Сырдарья и ниже 3000 м в бассейне реки Амударья.

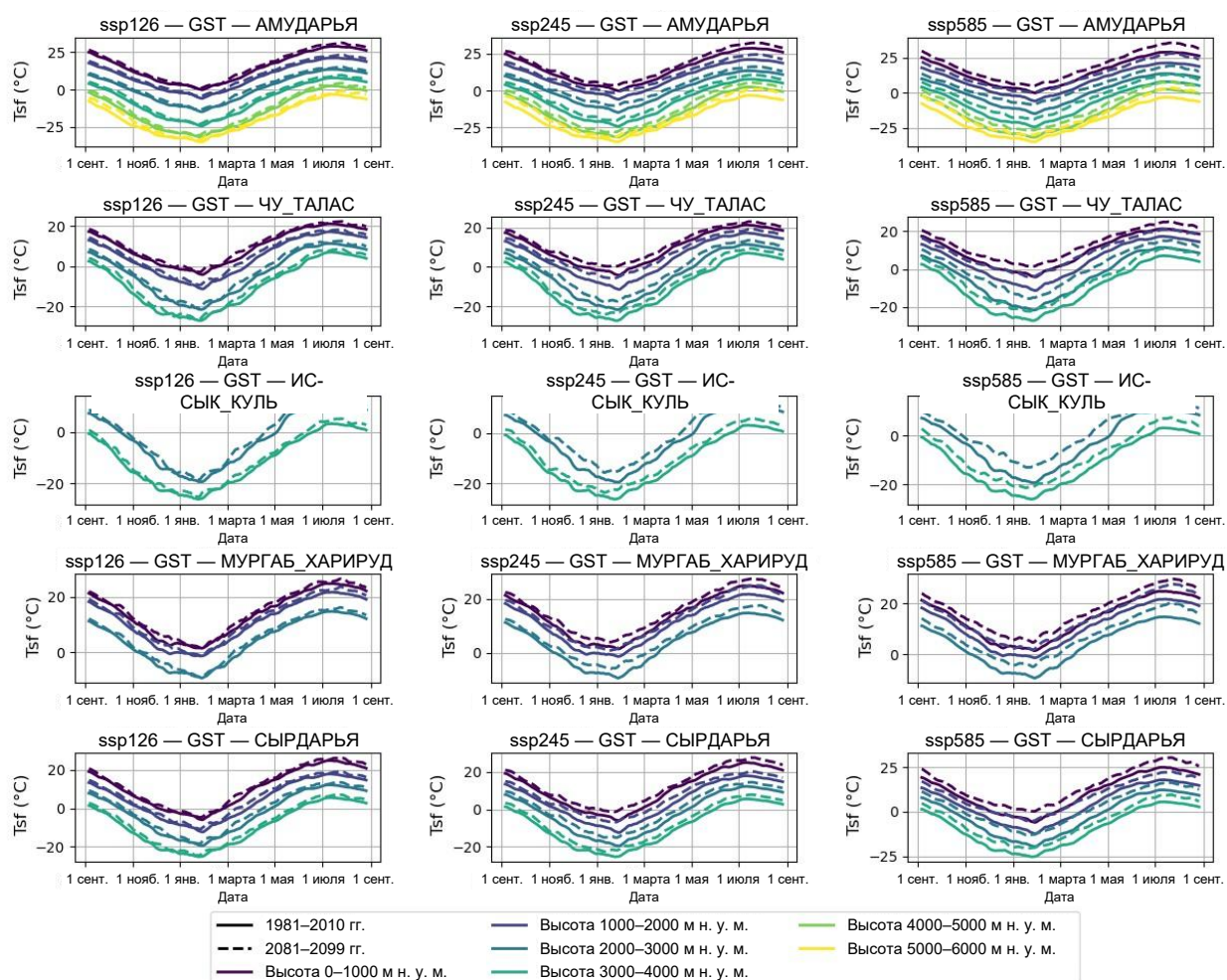


Рисунок 14. Сезонность изменения климата для показателя температуры приземного воздуха (GST) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года) (seasonalCycle_multiplot_hist_multiscenario.py)

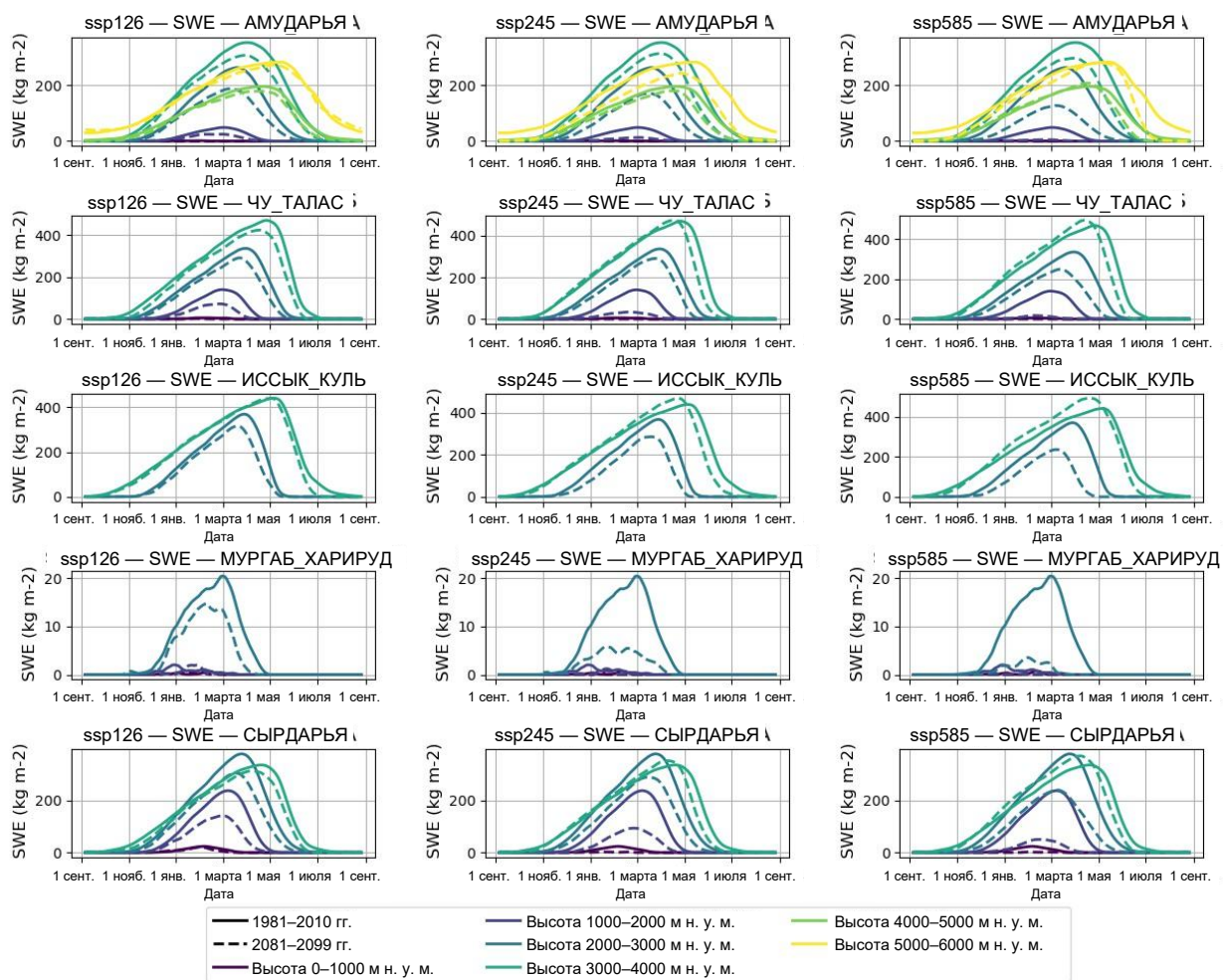


Рисунок 15. Сезонность изменения климата для показателя водного эквивалента снега (SWE) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года)

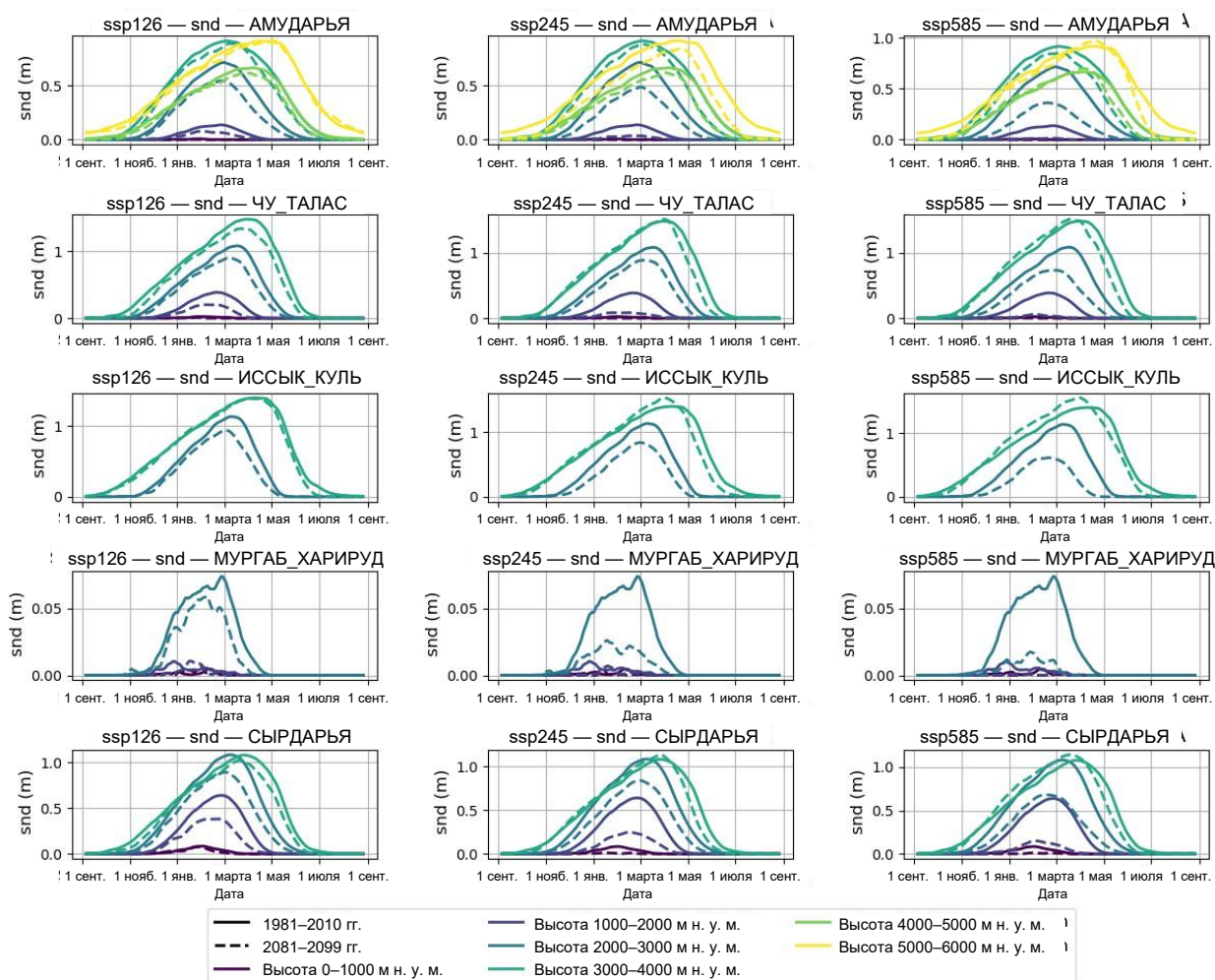


Рисунок 16. Сезонность изменения климата для показателя толщины снежного покрова (snd) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года)

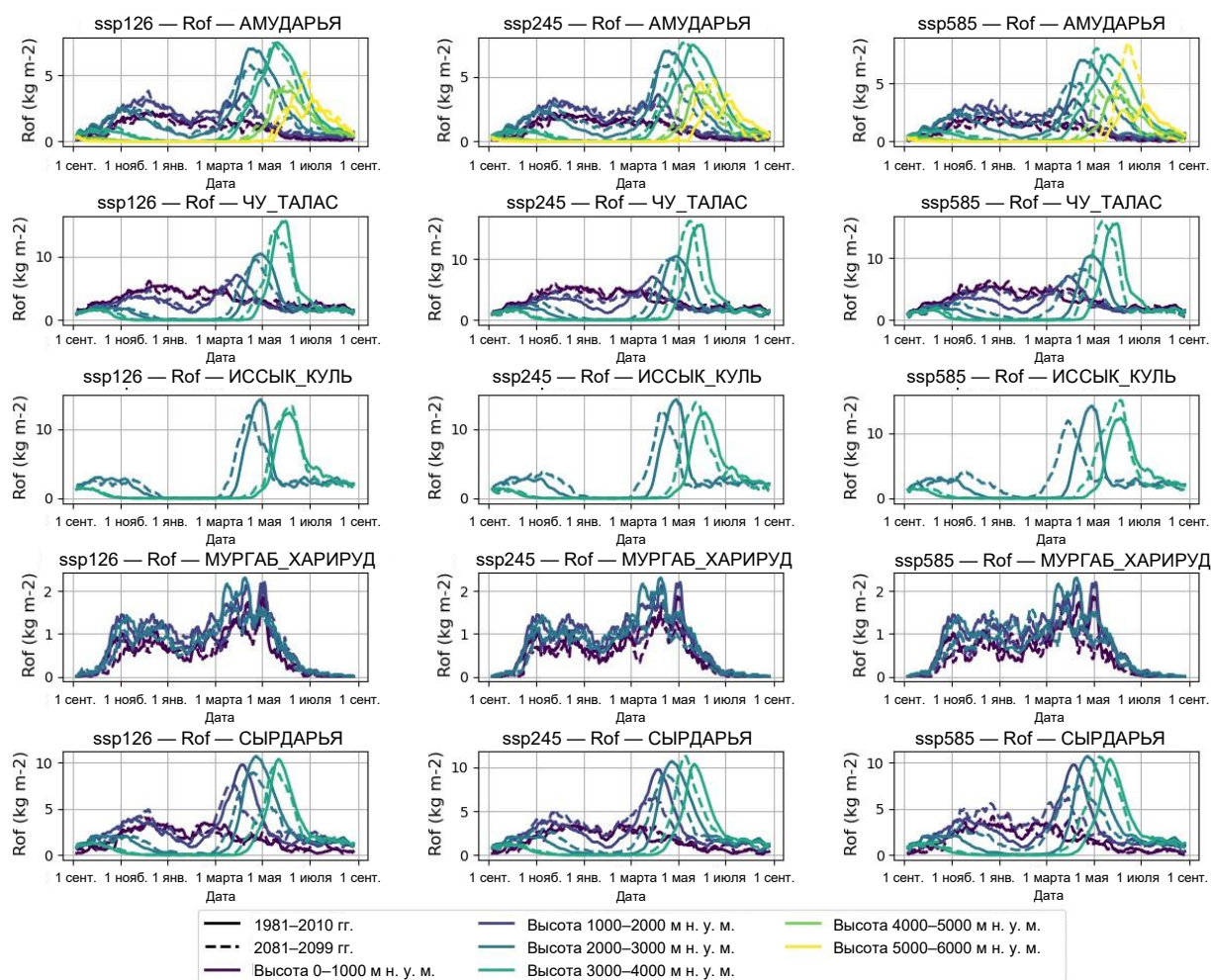


Рисунок 17. Сезонность изменения климата для показателя стока снеготаяния (Rof) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года)

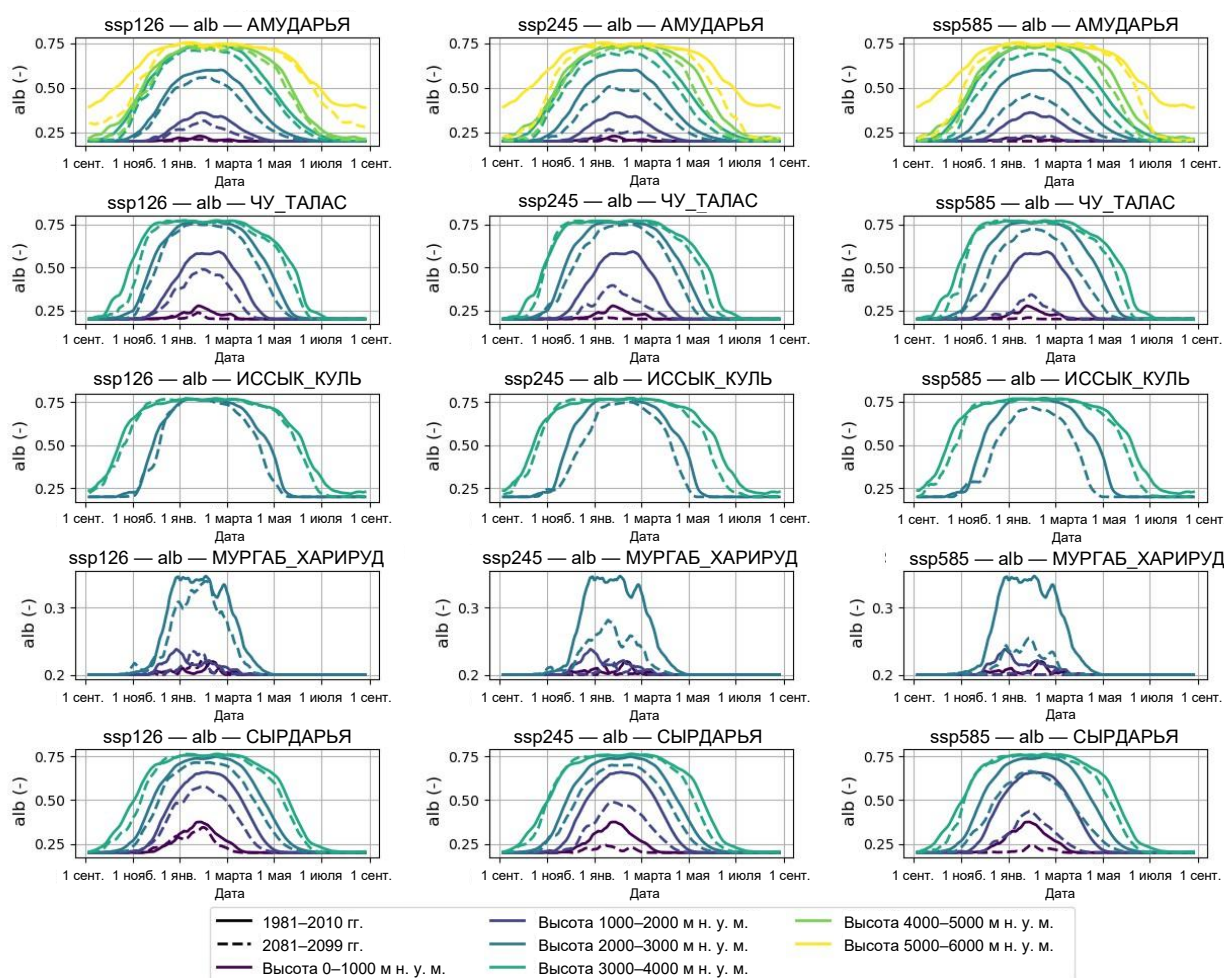


Рисунок 18. Сезонность изменения климата для показателя альбеда поверхности (alb) в отдалённом будущем (2081–2100 гг.) по сравнению с референтным периодом (1981–2010 гг.). Анализ проводится по трём климатическим сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты представлены в виде средних значений для каждого периода, охватывающего полный гидрологический год (с 1 сентября по 31 августа следующего года)

Карты показателей

В данном разделе представлены ключевые показатели, усреднённые по основному водосборному бассейну модельной области НМСА (221 водосбор). Это позволяет получить региональную картину результатов, имеющих отношение к управлению водными ресурсами в Центральной Азии. Каждый из этих водосборных бассейнов определяется водомерным узлом, эксплуатируемым соответствующей национальной гидрометеорологической службой на его выходе, и используется в качестве ключевой водохозяйственной единицы для принятия решений в различных проектах и исследованиях (например, Siegfried et al., 2024).

Основные наблюдения:

- потепление во всех районах и сценариях, наиболее сильно выраженное в высокогорных районах (Памир, Тянь-Шань);
- сток уменьшается на западной окраине региона и увеличивается на Северном и Восточном Памире. Снижение происходит в районе наибольшего образования стока;
- водный эквивалент снега и толщина снежного покрова уменьшаются по всем сценариям, за исключением Восточного Памира (увеличение сигнала зимних осадков);

- альbedo уменьшается по всему региону, что указывает на уменьшение снежного покрова во всех сценариях, особенно там, где нет компенсирующего увеличения количества зимних осадков (западная окраина/районы с текущим высоким уровнем осадков).

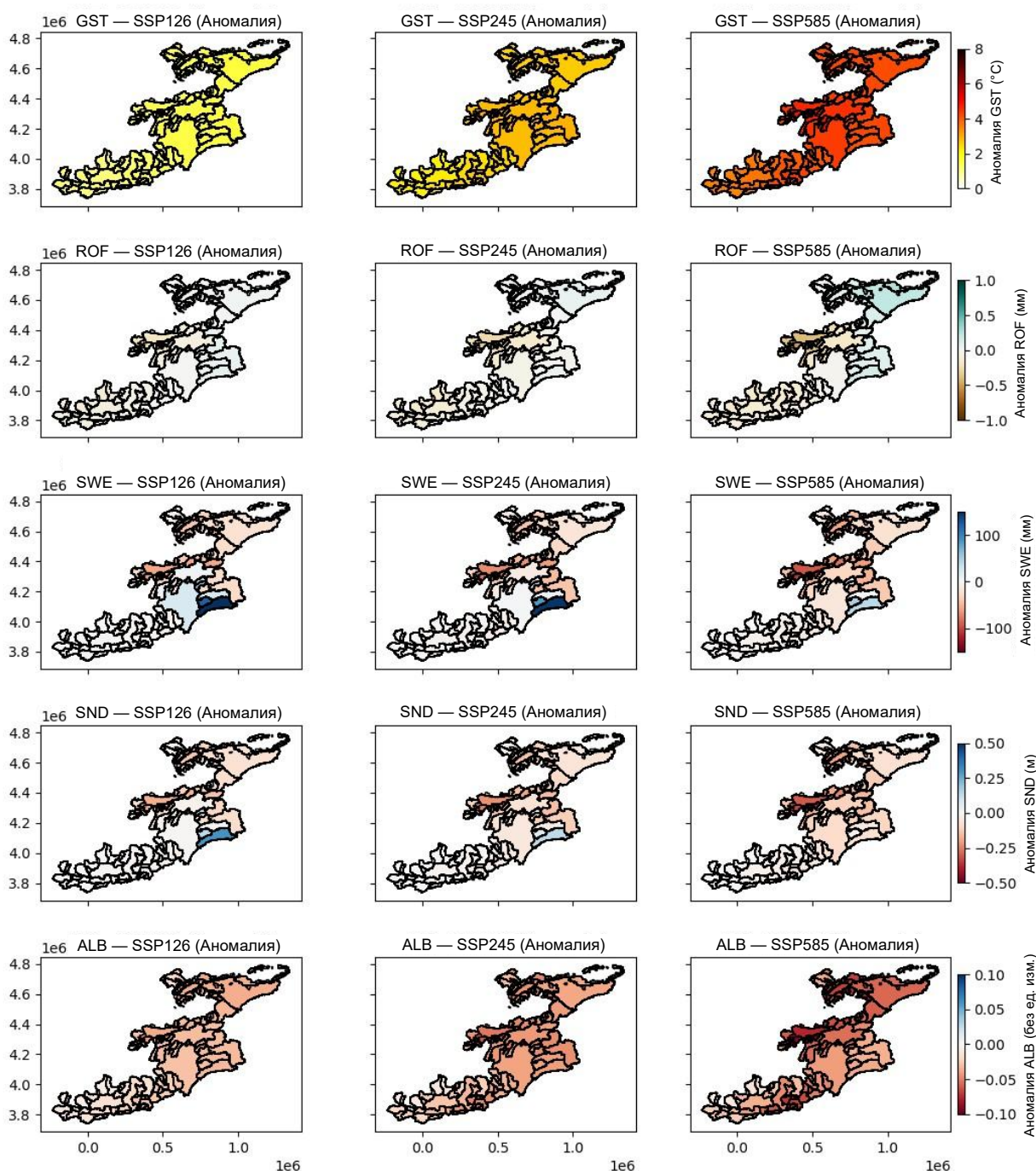


Рисунок 19. Карты аномалий показателей для периода отдалённого будущего, агрегированные по водосборам НМКА для трёх сценариев — SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5. Аномалии рассчитаны как отношение значений показателей периода отдалённого будущего (2081–2100 гг.) к историческому периоду (1981–2010 гг.). Показаны температура приземного воздуха (GST), сток снеготаяния (ROF), водный эквивалент снега (SWE), толщина снежного покрова (snd), альbedo (alb)

Полные растровые карты

В этом разделе представлены полные наборы растровых данных с разрешением 500 м по каждой переменной для исторического периода (1981–2010 гг.) и отдалённого будущего в сценарии SSP5-8.5

(2081–2100 гг.). Основные тенденции, обсуждавшиеся до сих пор, визуализируются в виде карт, приближенных к необработанным данным.

Основные наблюдения:

- **GST** увеличивается на всей территории модельной области;
- **ROF** уменьшается на западе (например, в Зарафшане), но увеличивается на севере (например, в Северном Тянь-Шане) и востоке (например, на Восточном Памире);
- **SWE** и **SND** уменьшаются по всей модельной области, причём наиболее выраженное снижение происходит на западе;
- **ALB**, представляющий снежный покров, уменьшается по всей модельной области, с наиболее значительным сокращением на более низких высотах — ниже 2000 м на севере и 3000 м на юге.

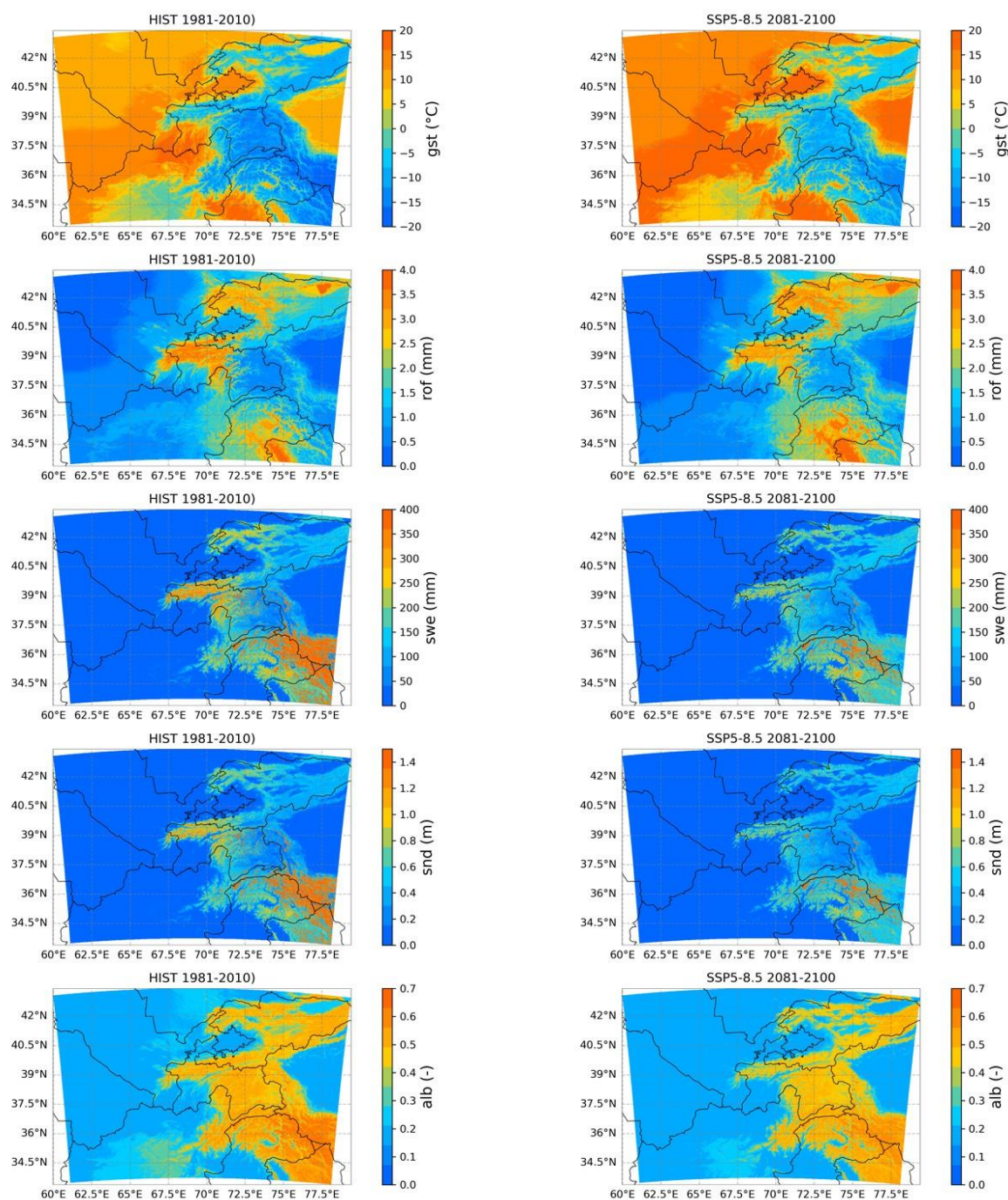


Рисунок 20. Растровые карты всех сценариев для исторического (HIST) периода (1981–2010 гг.) и сценария SSP5-8.5 для отдалённого будущего (2081–2100 гг.)

7. Веб-приложения

Ключевым компонентом стратегии распространения информации в рамках данного проекта является разработка **двух интерактивных онлайн-приложений Scenario Explorers** («обозреватели сценариев»). Эти веб-приложения позволяют пользователям в интуитивно понятной форме изучить результаты комплексных расчётов снежного покрова и климатических моделей по нескольким сценариям, временным периодам, бассейнам и высотным зонам. Цель — сделать данные доступными и полезными для широкого круга заинтересованных сторон, включая водохозяйственные организации, научные круги и директивные органы.

Обозреватель сезонных изменений

[Snow Climate Scenario Explorer](#) — обозреватель сценариев изменения снежного покрова с климатом показывает интерактивные графики сезонной эволюции основных параметров снежного покрова, включая водный эквивалент снега, толщину снежного покрова, сток снеготаяния и альбедо. Пользователь может выбрать переменную, речной бассейн (например, Амударья, Сырдарья), высотную зону и климатический сценарий, чтобы изучить, как меняются сезонные характеристики снежного покрова в течение XXI века.

Это приложение наглядно отображает информацию, представленную на рисунках 12–16 отчёта, предлагая пользователю возможность изучить:

- изменения в сроках и величине пиковых значений водного эквивалента снега или стока снеготаяния;
- изменения в продолжительности снежного покрова на разных высотах;
- различия между сценариями выбросов SSP.

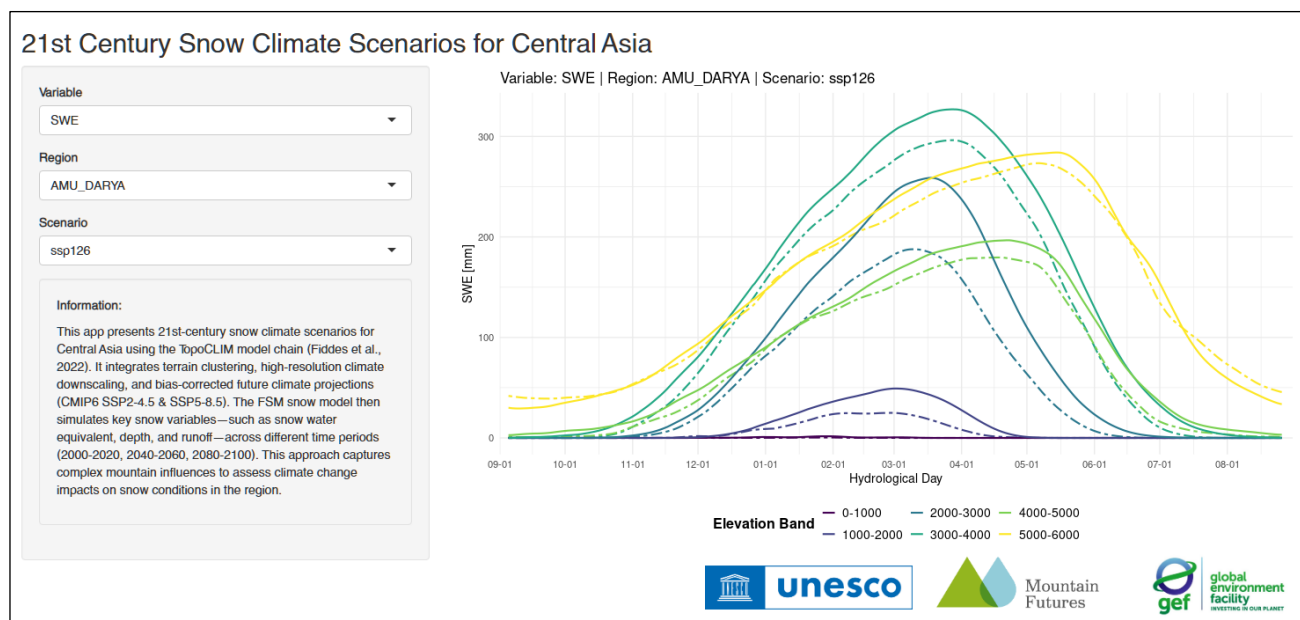


Рисунок 21. Обзор сценариев изменения снежного покрова с климатом

Атлас аномалий снежного покрова

[Snow Anomaly Atlas](#) — атлас аномалий снежного покрова, — предлагает обзор моделируемого воздействия климата с территориальной привязкой. Пользователи могут изучить карты прогнозируемых аномалий для ключевых переменных по сравнению с историческими базисными показателями, таких как потеря запасов воды в снежном покрове или уменьшение альбеда при различных сценариях и временных периодах. Эти карты подчёркивают региональные различия в уязвимости различным факторам воздействия, помогая наглядно представить, какие районы Центральной Азии в наибольшей степени страдают от сокращения запасов снега.

Этот инструмент соответствует рисунку 19 отчёта и позволяет проводить детальную территориальную интерпретацию сигналов изменения снежного покрова с климатом.

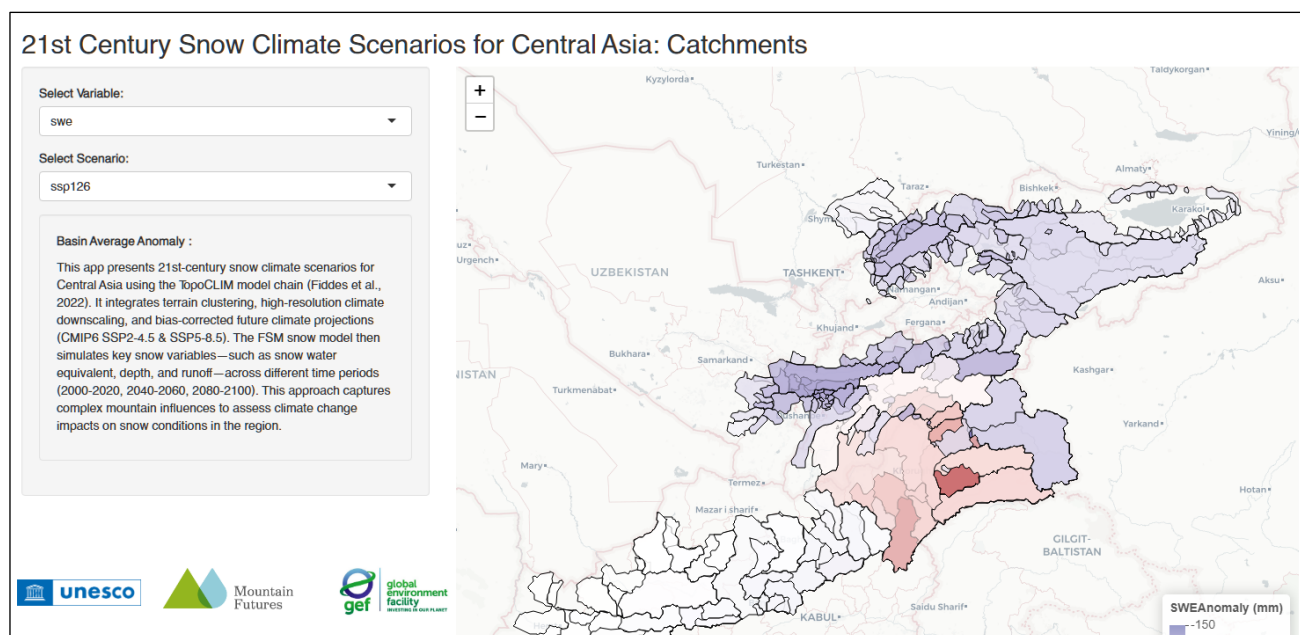


Рисунок 22. Атлас аномалий снежного покрова

8. Основные выводы

Температура приземного воздуха

Температура приземного воздуха — ценный параметр для изучения энергетического баланса поверхности и взаимодействия между земной поверхностью и атмосферой. Этот показатель объединяет эффекты солнечной радиации, теплопроводности и конвективного теплообмена и играет ключевую роль в контроле динамики снеготаяния, стабильности многолетней мерзлоты и роста растительности.

По всем смоделированным климатическим сценариям, временным периодам и районам Центральной Азии мы наблюдаем чёткую и устойчивую тенденцию к потеплению температуры приземного воздуха. Примечательно, что это потепление не является равномерным:

- **наиболее сильное потепление наблюдается в зимние месяцы (декабрь — февраль)**, что может привести к более частым циклам таяния-замерзания снега, уменьшению толщины снежного покрова и сокращению его продолжительности даже в традиционно холодные периоды;
- **на больших высотах наблюдается усиленное потепление**, которое часто называют *высотно-зависимым потеплением*, что угрожает долгосрочному сохранению высокогорной многолетней мерзлоты и ускоряет изменения в криосфере ключевых водосборных бассейнов;
- эти тенденции сигнализируют о фундаментальных изменениях в тепловом режиме горных районов и имеют широкие последствия для гидрологии, экологии и инфраструктуры высокогорных регионов.

Водный эквивалент снега и толщина снежного покрова

Толщина снежного покрова — знакомый и широко наблюдаемый параметр, который даёт представление о режимах сезонного накопления снега и территориальной изменчивости снежного покрова. Однако водный эквивалент снега является более гидрологически значимым показателем, представляющим общий объём воды, хранящейся в снежном покрове, который будет высвобождаться в сезоны таяния.

Наше моделирование выявило последовательное сокращение запаса воды в снеге во всех сценариях, особенно на более низких высотах:

- **в бассейне Сырдарьи** потери водного эквивалента снега наиболее выражены ниже ~2000 м; **в бассейне Амударьи** этот порог повышается до ~3000 м из-за более южной широты и более высокой исходной снеговой линии;
- **пик запаса воды в снежном покрове приходится на более раннее время года** — на несколько недель при сценариях средних и высоких выбросов, а **время начала таяния также сдвигается на более раннюю дату**, что ведёт к сокращению снежного сезона и увеличению риска несоответствия водообеспеченности;
- **в бассейнах низовий, таких как афганский Мургаб, потеря водного эквивалента снега будет практически полной** во всех, кроме самых оптимистичных сценариев и благоприятных высотных зон, что может иметь серьёзные последствия для весенней и летней водообеспеченности территорий низовий;
- эти изменения ставят под угрозу надёжность снежного покрова как естественного резервуара воды, особенно в районах, которые в значительной степени зависят от талой воды для нужд сельского хозяйства, питьевого и хозяйственно-бытового водопользования и гидроэнергетики.

Сток снеготаяния

В рамках данного исследования рассматривается речной сток, формируемый как за счёт таяния снега, так и за счёт жидких осадков, что позволяет получить комплексное представление о том, как может меняться водообеспеченность региона в условиях меняющегося климата.

Результаты моделирования показывают сильные территориальные контрасты в будущих тенденциях стока:

- **в северных и восточных высокогорьях**, особенно на высотах более 3500 м, **прогнозируется увеличение стока**, что согласуется с увеличением количества зимних осадков, выпадающих в виде снега, и более частыми зимними процессами таяния;
- и наоборот, **в западных районах образования стока** (включая водосборные бассейны Зарафшана, Чаткала и Таласа), **ожидается снижение стока по всем климатическим сценариям**, что обусловлено уменьшением накопления снега и более ранним таянием;
- **сроки стока также меняются**, пик стока приходится на более ранний период — до месяца в сценариях с высоким уровнем выбросов, — что может привести к несоответствию между пиковой доступностью водных ресурсов и пиком потребности сельского хозяйства в воде в конце весны и летом;
- такое изменение сезонности и объёма стока может создать дополнительную нагрузку на районы, уже испытывающие дефицит воды, и потребует переосмысления режимов работы водохранилищ, планирования ирригации и достижения соглашений о совместном использовании трансграничных вод.

Альbedo как косвенный показатель наличия снежного покрова

Альbedo, отражательная способность земной поверхности, тесно связана со снежным покровом. Свежевыпавший снег обычно имеет высокие значения альbedo (~0,8 или выше), отражая большую часть поступающей солнечной радиации и играя важную роль в энергетическом балансе поверхности. В данном исследовании альbedo используется в качестве **косвенного показателя наличия снежного покрова**, что позволяет получить представление о протяжённости снежного покрова с территориальной привязкой.

Основные результаты моделирования:

- **сильное снижение альbedo на высотах ниже 2000 м в бассейне Сырдарьи и ниже 3000 м в бассейне Амударьи** свидетельствует о значительном сокращении снежного покрова на более низких высотах, причём особенно резкое сокращение происходит при сценариях средних и высоких выбросов;
- **сезон снежного покрова становится короче в обоих пределах**, с более поздним наступлением осенью и более ранним таянием весной. Эти изменения наблюдаются во всех смоделированных временных периодах и климатических сценариях;
- в уязвимых низко- и средневысотных зонах **потеря снежного покрова** в некоторых сценариях **практически полная**, что приводит к резкому снижению альbedo поверхности. Это не только ускоряет местное потепление за счёт эффекта обратной связи альbedo, но и изменяет функционирование экосистем и сроки стока снеготаяния;
- эти связанные с альbedo изменения отражают и усиливают более общую деградацию криосферы и подчёркивают необходимость срочного принятия стратегий адаптации водных ресурсов к условиям быстрого потепления среды горных районов.

Список литературы

- Armstrong, R. L., Rittger, K., Brodzik, M. J., Racoviteanu, A., Barrett, A. P., Khalsa, S. S., Raup, B., et al.: Runoff from glacier ice and seasonal snow in High Asia: Separating meltwater sources in river flow, *Reg. Environ. Change*, 19, 1249–1261, <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01460-0>, 2019. — Essery, R.: A Factorial Snowpack Model (FSM 1.0), *Geosci. Model Dev.*, 8, 3867–3876, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3867-2015>, 2015.
- Boucher, Olivier, Jérôme Servonnat, Anna Lea Albright, Olivier Aumont, Yves Balkanski, Vladislav Bastrikov, Slimane Bekki, et al., 2020. “Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model.” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 12 (7): e2019MS002010.
- Fiddes, J. and Gruber, S.: TopoSUB: a tool for efficient large area numerical modelling in complex topography at sub-grid scales, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1245–1257, <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1245-2012>, 201.
- Fiddes, J., Gruber, S.: TopoSCALE v.1.0: Downscaling gridded climate data in complex terrain, *Geosci. Model Dev.*, 7, 387–405, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-387-2014>, 2014.
- Fiddes, J., Aalstad, K., and Westermann, S.: Hyper-resolution ensemble-based snow reanalysis in mountain regions using clustering, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4717–4736, <https://doi.org/10.5194/hess-23-4717-2019>, 2019.
- Fiddes, J., Aalstad, K., Lehning, M.: TopoCLIM: Rapid topography-based downscaling of regional climate model output in complex terrain v1.1, *Geosci. Model Dev.*, 15, 1753–1768, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1753-2022>, 2022.
- Harrison, S., Kargel, J., Huggel, C., et al.: Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods, *The Cryosphere*, 12, 1195–1209, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>, 2018.
- Held, I. M., H. Guo, A. Adcroft, J. P. Dunne, L. W. Horowitz, J. Krasting, E. Shevliakova, et al., 2019. “Structure and Performance of GFDL’s CM4.0 Climate Model.” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11 (11): 3691–3727.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al.: The ERA5 global reanalysis, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 1999–2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>, 2020.
- Huss, M., Hock, R., Bauder, A., Funk, M.: Global-scale hydrological response to future glacier mass loss, *Nature Clim. Change*, 7, 673–677, <https://doi.org/10.1038/nclimate3371>, 2017.
- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., et al.: Importance and vulnerability of the world’s water towers, *Nature*, 577, 364–369, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>, 2020.
- Kraaijenbrink, P. D. A., Stigter, E. E., Yao, T., Immerzeel, W. W.: Climate change decisive for Asia’s snow meltwater supply, *Nature Clim. Change*, 11, 591–597, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01088-8>, 2021.
- Lange, S.: ISIMIP3b bias adjustment fact sheet, ISIMIP, <https://www.isimip.org/gettingstarted/isimip3b-bias-adjustment/>, 2021.
- Marti B, Yakovlev A, Karger DN et al., (2023) CA-discharge: geo-located discharge time series for mountainous rivers in Central Asia. *Sci Data* 10:579. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02474-8>
- Sellar, Alistair A., Colin G. Jones, Jane P. Mulcahy, Yongming Tang, Andrew Yool, Andy Wiltshire, Fiona M. O’Connor, et al., 2019. “UKESM1: Description and Evaluation of the U.K. Earth System Model.” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11 (12): 4513–58.
- Siegfried, Tobias, Aziz Ul Haq Mujahid, Beatrice Marti, Peter Molnar, Dirk Nikolaus Karger, and Andrey Yakovlev. 2024. “Unveiling the Future Water Pulse of Central Asia: A Comprehensive 21st Century Hydrological Forecast from Stochastic Water Balance Modeling.” *Climatic Change* 177 (9): 1–19.

Shiogama, Hideo, Shinichiro Fujimori, Tomoko Hasegawa, Michiya Hayashi, Yukiko Hirabayashi, Tomoo Ogura, Toshichika Iizumi, Kiyoshi Takahashi, and Toshihiko Takemura. 2023. "Important Distinctiveness of SSP3–7.0 for Use in Impact Assessments." *Nature Climate Change* 13 (12): 1276–78.

Yukimoto, Seiji, Hideaki Kawai, Tsuyoshi Koshiro, Naga Oshima, Kohei Yoshida, Shogo Urakawa, Hiroyuki Tsujino, et al., 2019. "The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component." *Journal of the Meteorological Society of Japan* 97 (5): 931–65.