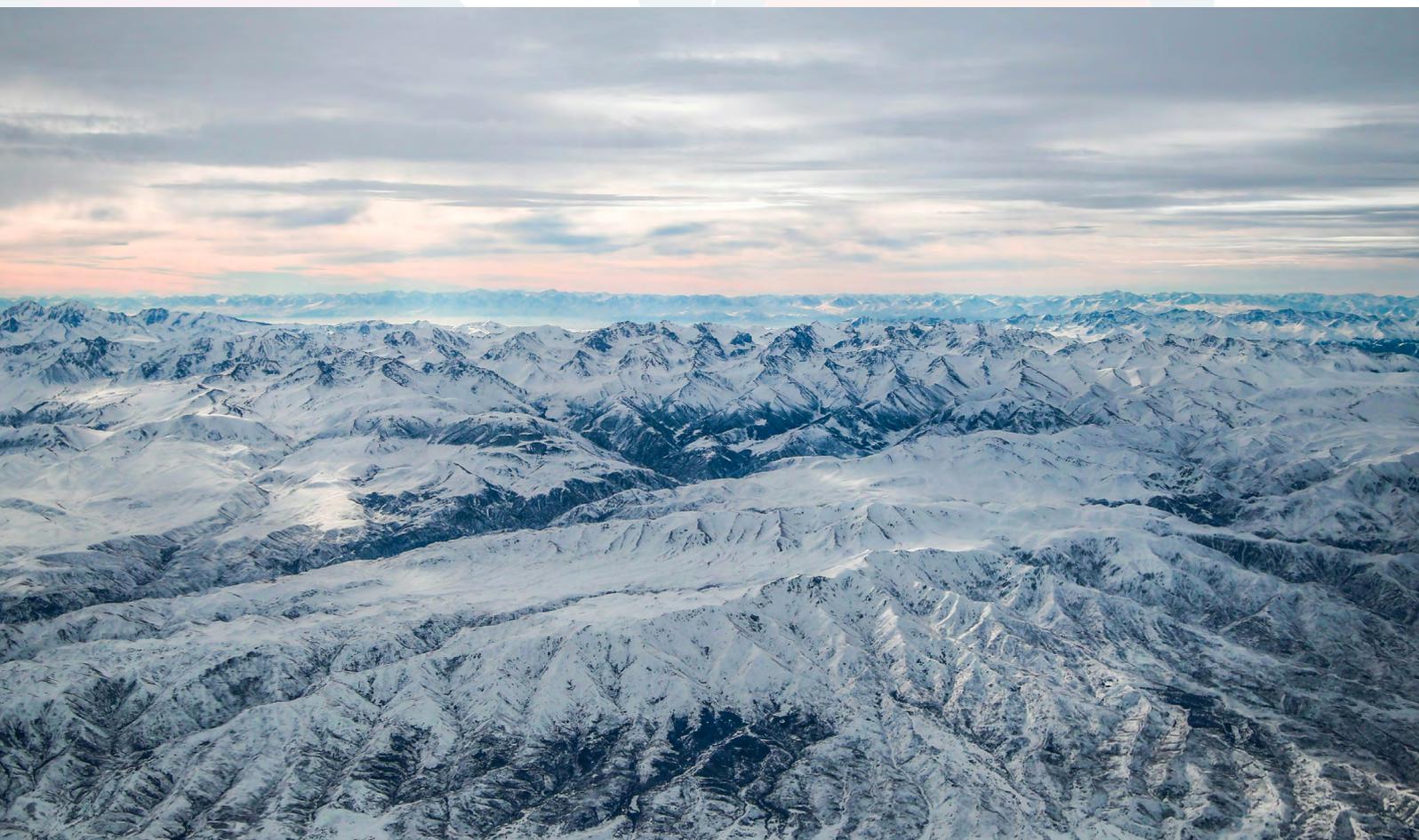




СЦЕНАРИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

НА ВКЛАД ЛЕДНИКОВ И ТАЛЫХ ВОД В ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ



Авторы:

**Мартина Барандун^а, Энрико Маттеа^а, Маттиас Хусса^б, Серикжан Атанов^а,
Томас Сакс^а, Руслан Кенжебаев^с, Джоэл Фиддес^д, Мартин Хельцле^а**

^а *Университет Фрибурга, Фрибург, Швейцария*

^б *ETHZ, Zurich, Switzerland*

^с *Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызстан,
(консультант проекта)*

^д *SLF, Давос, Швейцария, (консультант проекта)*

Данная публикация была подготовлена в рамках проекта «Укрепление устойчивости стран Центральной Азии путем содействия региональному сотрудничеству в области оценки нивально-гляциальных систем для разработки комплексных методов устойчивого развития и адаптации к изменениям климата», финансируемого Глобальным экологическим фондом (ГЭФ), реализуемого Программой Развития ООН (ПРООН) и исполняемого ЮНЕСКО. Ответственность за содержание публикации несут исключительно автор(ы); оно не обязательно отражает взгляды Секретариата ГЭФ, ПРООН и ЮНЕСКО. Используемые в публикации наименования и изложение материала не означают выражения какого-либо мнения со стороны ГЭФ, ПРООН или ЮНЕСКО в отношении правового статуса какой-либо страны, территории, города или района, их властей, а также в отношении делимитации их границ.

Рекомендуемое название для цитирования:

Барандун А., Маттеа Э., Хусса М., Атанов С., Сакс Т., Кенжебаев Р., Фиддес Дж., Хельцле М. (2024). Сценарии воздействия изменения климата на вклад ледников и вклад талых вод в обеспеченность Центральной Азии водными ресурсами. Приложение 2 к изданию: Диагностический анализ основных проблем в области мониторинга, наблюдения и исследований криосферы в Центральной Азии. Проект ГЭФ–ПРООН–ЮНЕСКО по криосфере, Университет Фрибурга, Алматы, Казахстан. 70 с.

Дата последнего обновления документа: 11 ноября 2024 года

Автор фото на обложке: Oziel Gómez/ Unsplash

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Мы выражаем глубокую признательность Центрально-Азиатскому региональному гляциологическому центру под эгидой ЮНЕСКО, Центрально-Азиатскому институту прикладных исследований Земли, Центру изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана, Национальному университету Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Научно-исследовательскому институту гидрометеорологии, Центру гидрометеорологической службы Республики Узбекистан и Редингскому университету за их вклад и сотрудничество в области мониторинга криосферы Центральной Азии.

Реализация этой работы была бы невозможна без помощи проекта ГЭФ-ПРООН-ЮНЕСКО по криосфере «Повышение устойчивости стран Центральной Азии путём обеспечения регионального сотрудничества в деле оценки высокогорных гляционивальных систем с целью разработки комплексных методов устойчивого развития и адаптации к изменению климата», финансируемого Глобальным экологическим фондом, реализуемого ПРООН и исполняемого ЮНЕСКО.

Мы благодарим проекты CROMO-ADAPT, We-Act, ARCH, SPI-PAMIR, SPI Techno и SPI Exploratory, реализуемые Университетом Фрибурга, за их участие в финансировании этой работы.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ	5
1.1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КРИОСФЕРЫ И ЕЁ РОЛЬ КАК ОСНОВНОГО ИСТОЧНИКА ВОДЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ	7
1.2. ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА КРИОСФЕРУ	9
1.3. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ	10
ГЛАВА 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.	14
2.1. ДАННЫЕ	14
2.2. МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ЛЕДНИКОВ И ЕЁ КАЛИБРОВКА	15
2.3. АСПЕКТЫ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ	21
ГЛАВА 3. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В БУДУЩЕМ	24
3.1. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В БУДУЩЕМ	24
3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЁМА ЛЕДНИКОВ В БУДУЩЕМ	26
ГЛАВА 4. ИЗМЕНЕНИЯ ВКЛАДА ТАЛЫХ ВОД ЛЕДНИКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В БУДУЩЕМ	29
4.1. ГОДОВОЙ ВКЛАД ТАЛЫХ ВОД.	29
4.2. СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВКЛАДА ТАЛЫХ ВОД	31
ГЛАВА 5. ОБСУЖДЕНИЕ	36
5.1. ИЗМЕНЕНИЯ ВКЛАДА В СТОК	36
5.2. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА.	38
ГЛАВА 6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	43
ПРИЛОЖЕНИЕ	65

1. ВВЕДЕНИЕ

Криосфера Центральной Азии является жизненно важным источником пресной воды и ключевым индикатором изменения климата. Однако понимание влияния криосферы на водный баланс региона в прошлом и будущем остаётся неудовлетворительным (Grigori et al., 2006). Криосфера по-разному реагирует на изменение климата, что приводит к колебанию вклада талых вод в баланс водосборных бассейнов, и существенно влияет на динамику водообеспеченности горных районов, каскадно распространяясь вниз по течению (Varis, 2014; Xenarios et al., 2019; Immerzeel et al., 2020; Nüsser, 2017; Nüsser et al., 2019). Это, в свою очередь, влияет на обеспеченность этих районов водными ресурсами, что усугубляет и без того повышенную уязвимость к колебаниям в водоснабжении и опасностям, связанным с климатом (Fay & Patel, 2008). С ростом населения и расширением водохозяйственной деятельности увеличение нагрузки на водные ресурсы (Pohl et al., 2017) создаёт ещё больше трудностей для адаптации сельских районов (Garcia & Brown, 2009; Nüsser et al., 2019), что зачастую усугубляется нехваткой финансовых и институциональных ресурсов для этих районов (Manandhar et al., 2017).

Прогнозы увеличения стока рек и уменьшения объёмов льда указывают на срочную необходимость разработки эффективных стратегий управления водными ресурсами. Тенденции потепления, наблюдаемые в горах Тянь-Шаня с 1970-х годов (Aizen et al., 1995; Марченко и соавт., 2007; Forsythe et al., 2017), подчёркивают необходимость разработки адаптационных мер для решения проблемы изменения гидрологических режимов. Сложная динамика криосферы требует принятия целостного подхода к управлению водными ресурсами в Центральной Азии. Продолжающиеся усилия по мониторингу и капиталовложения в исследования процессов, происходящих в криосфере, жизненно важны для адаптации к меняющимся гидрологическим режимам и смягчения последствий изменения климата. Учитывая разнообразие потребности в воде и проблемы, с которыми сталкиваются страны Центральной Азии, для улучшения точности прогнозов на будущее необходим совместный подход. Эффективный мониторинг криосферы должен опираться на существующие структуры, такие как Глобальная сеть мониторинга ледников (GTN-G) и Глобальная сеть мониторинга криолитозоны

(GTN-P), и формировать основу для улучшения достоверности сценариев будущих изменений. В свою очередь, стратегии адаптации и смягчения последствий должны быть адаптированы к конкретным потребностям каждого региона, страны и водосборного бассейна. Признавая неоднородность связанных с водными ресурсами проблем в каждой стране, трансграничное сотрудничество должно включать целевые инициативы для решения конкретных вопросов.

Например, Казахстан, характеризующийся наличием крупных озёр и рек, сталкивается с проблемами неравномерного распределения воды и внешней зависимости от водных ресурсов (Karatajev et al., 2017). Кыргызстан в значительной степени полагается на криосферные ресурсы для целей орошения (Hill et al., 2017; Saks et al., 2022; FAO, 2016), а Узбекистан почти на 90 % использует талые воды снегов и ледников Памира и Тянь-Шаня для орошения (Жумаева, 2021). Туркменистан сталкивается с растущим дефицитом воды из-за изменения климата и находится в сильной зависимости от реки Амударья (Zonn, 2012). Таджикистан, являющийся крупным поставщиком воды в Амударью, в первую очередь зависит от водных ресурсов своей обширной криосферы (Духовный и соавт., 2014). В будущем эти специфические для каждой страны проблемы будут только возрастать. Первостепенное значение будет иметь углубление понимания конкретных потребностей страны в улучшении управления водными ресурсами на основе более глубоких научных знаний об ожидаемых изменениях в основных водных ресурсах в условиях текущего и будущего изменения климата.

Уникальное расположение Тянь-Шаня и Памира характеризуется неоднородной климатической средой, наличием высоких горных хребтов и обширных криосферных систем, включая сезонные снежные покровы, ледники и многолетнюю мерзлоту. Сложное взаимодействие этих элементов оказывает глубокое влияние на обеспеченность региона водными ресурсами и создаёт разнообразные гидрологические режимы, на которые влияют таяние снега, ледников и грунтовые воды. Айзен и соавторы (Aizen et al., 1995) классифицировали реки Тянь-Шаня по четырём гидрографическим режимам, характеризующихся различными процессами формирования стока: реки снегового

питания, ледникового питания, дождевого питания и питания подземными водами, каждый из которых имеет уникальные характеристики стока.

Численные модели широко используются для реконструкции процессов прошлых периодов и прогнозирования будущих реакций различных гидрологических режимов. Простые модели подходят для изучения региональных реакций криосферы, а также общих закономерностей и изменений в стоке талых вод при различных гидрологических режимах (Lutz et al., 2014; Immerzeel et al., 2015).

Основным ограничением таких эффективных с вычислительной точки зрения моделей является невозможность моделирования мелкомасштабных процессов используя производные эмпирические или статистические зависимости с фиксированными параметрами (Rounce et al., 2014). При использовании региональных моделей часто не учитываются соответствующие процессы (например, сублимация, теплоизоляционный эффект снега, пористость грунта, повторное замерзание талой воды), которые могут оказывать значительное влияние на представление эволюции состояния снежного покрова, фирна и льда во времени (Kronenberg et al., 2021). В частности, при нелинейных и плохо изученных обратных связях прогнозы на будущее могут быть очень неопределёнными. Более детальные и сложные модели полезны для понимания и количественной оценки роли отдельных процессов, связывающих атмосферу, криосферу и гидросферу (например, Mölg et al., 2014). Такие физически корректные модели могут лучше отразить цепочку процессов при изменении климата, влияющих на криосферу и её реакцию на выделение талых вод, в том числе нелинейных.

Однако зачастую они требуют слишком большого объёма вычислений, включают большое количество калибровочных параметров, которые плохо поддаются ограничениям, требуют большого количества исходных данных, которые часто недоступны для регионов со слабым охватом данными, и поэтому их применение ограничивается отдельными участками или точками. Таким образом, нам часто приходится искать компромисс между использованием эффективных, применимых в регионах моделей, которые значительно упрощают физические процессы и ориентированы на изучение воздействия, или физически корректных моделей, которые имеют сложное и более точное представление процессов, но применимы только на отдельных участках или даже точках. Сочетание обоих подходов является ключом к отражению и улучшению нашего понимания будущих крупномасштабных последствий изменения криосферы, вызванных изменением климата. В данном докладе мы рассматриваем изменения в состоянии ледников и их влияние на ресурсы пресной воды для различных бассейнов Центральной Азии до конца столетия. Мы используем результаты сильно параметризованной модели эволюции ледников. В разделе обсуждения мы связываем результаты моделирования, ориентированного на изучение воздействия, с более детальными исследованиями процессов. На следующем этапе мы используем улучшенные климатические временные ряды для прогнозирования изменений снежного покрова и снеготаяния, а также гидрологические модели, включающие данные гляциологических наблюдений и наблюдений за снежным покровом, чтобы лучше предсказать будущее влияние криосферы на обеспеченность Центральной Азии водными ресурсами.

1.1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КРИОСФЕРЫ И ЕЁ РОЛЬ КАК ОСНОВНОГО ИСТОЧНИКА ВОДЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Криосфера играет важнейшую роль в формировании гидрологического режима региона. Поскольку Центральная Азия сталкивается с насущными проблемами изменения климата, всестороннее понимание его воздействия на криосферу, а также проактивные меры адаптации и смягчения этого воздействия будут иметь решающее значение для устойчивого управления водными ресурсами и укрепления сопротивляемости региона.

Сезонный снежный покров является основным компонентом годового водного бюджета в Центральной Азии, обеспечивая более 74 % водности Сырдарьи и более 69 % — Амударьи (Armstrong et al., 2019). Для сравнения, вклад осадков составляет всего 23 %, а вклад ледникового льда в годовой сток этих рек составляет 2 % и 8 % соответственно (Armstrong et al., 2019).

В сухой сезон с июля по сентябрь таяние ледников приобретает важнейшее значение в речном стоке. Вклад талых вод ледников в течение вегетационного периода может увеличиваться до 70–90 % (Huss & Hock, 2018; Saks et al., 2021). Реакция ледников в Центральной Азии неоднородна в зависимости от территории и времени, вследствие чего вклад талых вод варьируется от водосбора к водосбору, что влияет на водообеспеченность горных районов и водопользователей низовий. Эта изменчивость в сочетании с меняющимися в будущем режимами таяния ледников и экстремальными погодными явлениями делает задачу управления водными ресурсами чрезвычайно сложной.

Помимо ледников, в Центральной Азии находится крупнейший в мире район горной многолетней мерзлоты. Занимаемая им площадь равна примерно 3,5 млн км², что составляет около 15 % от общей площади вечной мерзлоты в северном полушарии (Gruber, 2012). Изменения теплового режима многолетней мерзлоты могут оказать значительное влияние на гидрологию, энергетический и влажностный балансы поверхности земли, углеродный обмен между литосферой и атмосферой, экосистемы и инженерную инфраструктуру региона (Jin et al., 2021; Hjort et al., 2022).

■ **КАЗАХСТАН.** Изменение климата привело к изменению структуры твёрдых

осадков, причём в исследованиях по Казахстану отмечается неоднородность таких изменений. Например, согласно одним исследованиям в некоторых районах, таких как Алтай и Тянь-Шань, наблюдается сокращение продолжительности и высоты снежного покрова (Zhou et al., 2017), а другие исследования показывают увеличение толщины снежного покрова в Тянь-Шане с 1961 по 2014 год (Li et al., 2019). По данным наблюдений гидрометеорологической службы Казахстана высота снежного покрова и водный эквивалент (в. э.) снега в горах Алтая за последние 30 лет увеличились на 72 % (Пиманкина и Такибаев, 2021). Данные наземных наблюдений и дистанционного зондирования показывают, что за последние 65 лет горное оледенение в Казахстане сократилось примерно на 43 % по площади и на 65 % по объёму (Severskiy et al., 2016; Kapitsa et al., 2020; Kokarev et al., 2022; Горбунов и соавт., 2018). В настоящее время непрерывные измерения баланса массы, начатые в 1957 году, ведутся только для ледника Центральный Туоксу в бассейне реки Малая Алматинка (WGMS, 2020). За период наблюдений 1958–2022 гг. ледник показывал преимущественно отрицательный баланс массы (–0,42 м в. э. в год) (Kapitsa et al., 2020; WGMS, 2023). Для Тянь-Шаня и Памира Барандун и соавторы (Barandun et al., 2021) оценили средневзвешенный по площади баланс массы ледников в $-0,23 \pm 0,37$ м в. э. в год с 1999/00 по 2017/18 год. Наблюдения за температурой многолетней мерзлоты на трёх участках в 1974–1977 и 1990–2009 гг. свидетельствуют о потеплении в казахстанской части гор Тянь-Шаня за последние 35 лет, причём повышение температуры составило от 0,38 °C до 0,68 °C на глубине 14–25 м (Марченко и соавт., 2007; Lin et al., 2010; Severskiy, 2017). Тенденции потепления температуры многолетней мерзлоты и воздуха указывают на то, что в ближайшие 20–30 лет температура многолетней мерзлоты может достичь почти нулевой отметки.

■ **КЫРГЫЗСТАН.** Водные ресурсы региона в значительной степени зависят от снега, ледников и многолетней мерзлоты, играющих важнейшую роль в обеспечении водой в засушливые летние периоды. Айзен и соавторы (Aizen et al., 1997) проанализировали данные о снеге со 110 станций за период с 1940 по 1991 год и обнаружили уменьшение среднегодовой высоты снежного покрова на 8–14 см на высотах ниже 2000 м над

уровнем моря и на 6–19 см на более высоких высотах. Данные долгосрочного мониторинга баланса массы, имеющие решающее значение для оценки состояния ледников, свидетельствуют о негативной тенденции в изменении массы ледников, причём различные исследования указывают на ежегодные потери в диапазоне от –0,16 до –0,61 м в. э. в год (Hoelzle et al., 2019; Barandun et al., 2018; Barandun et al., 2015; Hoelzle et al., 2017; Kenzhebaev et al., 2017; Kronenberg et al., 2016; Azisov et al., 2022). Несмотря на то, что в некоторые годы наблюдался положительный баланс, обусловленный кратковременными (или временными) благоприятными условиями, общая тенденция по нескольким наблюдаемым ледникам указывает на увеличение абляции, опережающее накопление. Измерения температуры в двух скважинах многолетней мерзлоты на глубине 30 м указывают на потепление примерно на 1°C в период с 1986 по 2024 год. Новые геофизические наблюдения в Кыргызстане показывают различные значения содержания льда для различных форм рельефа и позволят получить более широкие оценки содержания замороженного льда в высокогорных условиях.

■ **ТАДЖИКИСТАН.** Ледники Таджикистана занимают площадь 8400 км², что составляет 6 % территории страны. Ледник Федченко, один из крупнейших за пределами полярных регионов (Lambrecht et al., 2014), значительно потерял в толщине с 1928 года, причём скорость истончения увеличилась с 2000 года (Lambrecht et al., 2018). По оценкам, баланс массы всего ледника отрицательный, и показатели баланса составили –0,27 м в. э. в год за период с 2000 по 2011 год и –0,51 м в. э. в год за период с 2011 по 2016 год (Lambrecht et al., 2018). Криосфера Таджикистана неоднородно реагирует на изменение климата, что усложняет понимание ситуации с доступностью водных ресурсов и изменений в будущем. Отсутствие прямых наблюдений затрудняет понимание местных процессов, подчёркивая необходимость усиленного мониторинга и моделирования для решения вопросов, связанных с растущими потребностями в воде. Прямых (in situ) наблюдений или данных о многолетней мерзлоте в Таджикистане мало, а существующие карты распространения многолетней мерзлоты часто основаны на упрощённых моделях, в которых упущены ключевые факторы, влияющие на встречаемость мерзлоты (например, Gruber & Mergili, 2013; S. Gruber, 2012). На Памире Мергили и соавторы (Mergili et al., 2012) определили около 84 % территории Горно-Бадахшанской автономной области как потенциальную многолетнюю мерзлоту, занимающую около 54 тыс. км². Горбунов (Горбунов, 1978) предположил, что спорадическая многолетняя мерзлота в Памиро-Алае начинается на высоте 3400–3800 м над уровнем моря,

а многолетняя мерзлота — выше 4000 м над уровнем моря. Тем не менее, изучение и мониторинг многолетней мерзлоты в Таджикистане находятся только на начальном этапе, поэтому необходимо приложить значительные усилия, чтобы достичь хорошего уровня понимания распределения многолетней мерзлоты и содержания в ней льда.

■ **УЗБЕКИСТАН.** Последние исследования указывают на уменьшение снежного покрова в Узбекистане, что подтверждается анализом спутниковых данных, показывающих уменьшение протяжённости и продолжительности снежного покрова за последние десятилетия. Исторические тенденции выпадения осадков также свидетельствуют о некотором снижении, что позволяет ожидать уменьшения площади снежного покрова, особенно в водосборных бассейнах на меньших высотах (Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по РККИ ООН, 2016). Площадь ледников в Узбекистане, расположенных в основном в бассейнах рек Кашкадарья, Пскем и Сурхандарья, значительно уменьшилась. В период с 1957 по 2010 год площадь оледенения сократилась на 14,4–56,7 %, при этом на фоне распада более крупных ледников образовалось множество мелких ледников (Кудышкин и соавт., 2014). Данные дистанционного зондирования указывают на значительное сокращение объёма льда в этих бассейнах. Текущие исследования включают постоянный мониторинг ледника Баркрак Средний, единственного ледника в Узбекистане, за которым ведётся непрерывное наблюдение и который демонстрирует тенденцию к ускорению потери массы (Hoelzle et al., 2017; проект CICADA, Университет Фрибурга и ALM-202107010).

Неоднородная реакция криосферы на изменение климата требует проведения постоянного мониторинга для оценки её влияния на состояние водных ресурсов в Центральной Азии в будущем, и, следовательно, того, как изменение климата повлияет на задачи управления водными ресурсами в каждой стране. Жизненно важно определить приоритеты текущих исследований и мониторинга для уточнения прогнозов и устранения неопределённостей в отношении элементов криосферы. Совместные международные усилия крайне важны для разработки комплексных мер по обеспечению сохранности водных ресурсов, охране экосистем и связанной с ними безопасности населения в Центральной Азии.

1.2. ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА КРИОСФЕРУ

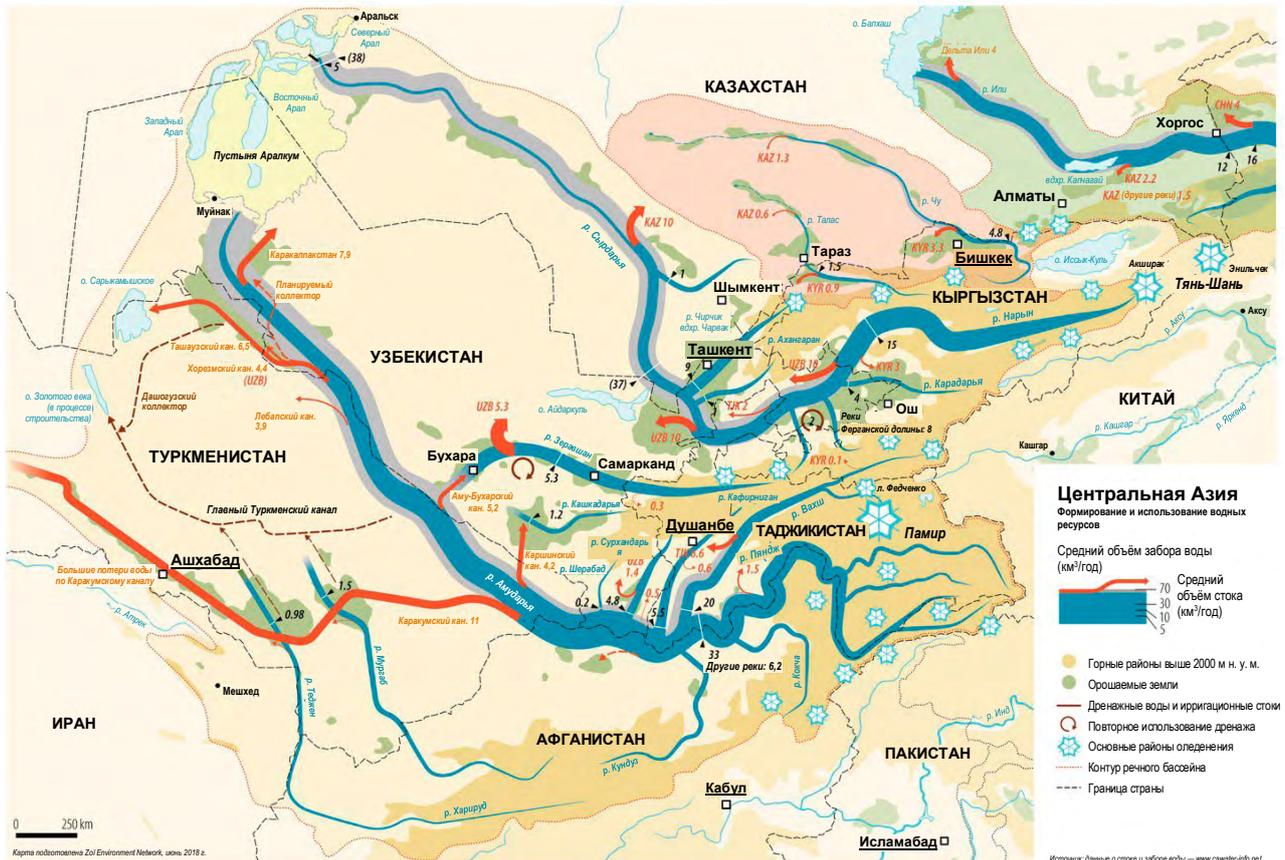
Регион Центральной Азии, включающий Казахстан, Кыргызстан, Таджикистан, Туркменистан и Узбекистан, характеризуется засушливым и полусушливым климатом со значительными перепадами температур и сложным рельефом. Высоты колеблются от менее 150 м над уровнем моря до более 7000 м над уровнем моря в хребтах Тянь-Шаня и Памира (Чуб, 2007). Средняя температура воздуха колеблется в широких пределах: январские минимумы достигают -54°C в Казахстане, а июльские максимумы — 50°C в пустыне Кызылкум. Годовое количество осадков также варьируется: на равнинах выпадает около 250 мм, в предгорьях — 250–500 мм, а в некоторых горных районах — до 2000 мм (Чуб, 2007). Около 80 миллионов человек зависят от водных ресурсов, образующихся в этом регионе. Более 25 тысяч ледников вносят значительный вклад в сток рек Амударья и Сырдарья, и служат индикаторами изменения климата (Barandun et al., 2020; Kriegel et al., 2013). Исследования с использованием глобальных климатических моделей/моделей общей циркуляции (ГКМ/МОЦ) указывают на значительную тенденцию потепления атмосферы в Центральной Азии (от 3°C до $11,4^{\circ}\text{C}$ к 2100 году) и уменьшение количества осадков, особенно в юго-восточной части региона (Ozturk et al., 2012; Ozturk et al., 2017). Климатические сценарии, рассчитанные с применением даунскейлинга, предполагают повышение температуры до 7°C в северных районах Центральной Азии и изменение

характера осадков: более влажные зимы на севере и более сухое лето в целом (Mannig et al., 2013; Huang et al., 2014). В ряде исследований также изучалась роль атмосферной циркуляции в экстремальных значениях осадков в условиях глобального потепления. Чжао и соавторы (Zhao et al., 2018) обнаружили, что субтропическое западное струйное течение может сместиться на юг, что потенциально увеличит количество летних осадков в северных регионах, но внесёт неопределённость в других местах. Между тем, Рейерс и соавторы (Reyers et al., 2013) спрогнозировали уменьшение годового количества осадков в бассейне реки Аксу. Негативное воздействие глобального потепления на ледники вызвало обеспокоенность по поводу перспектив обеспеченности водными ресурсами: прогнозируется значительное сокращение ледников в регионах Тянь-Шаня и Памира (Sorg et al., 2015; Kure et al., 2013). Однако прогнозы будущих изменений состояния ледников в регионе остаются крайне неопределёнными.

Таким образом, Центральная Азия сталкивается с серьёзными последствиями изменения климата, включая отступление ледников, нехватку воды и опустынивание, что негативно сказывается на жизни общества и экосистем. Решение этих проблем требует улучшения управления водными ресурсами, развития устойчивого регионального сотрудничества и реализации эффективных стратегий управления климатическими рисками.

1.3. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Рисунок 1.1.1. Схематическое изображение ресурсов поверхностных вод и их забора в Центральной Азии



Источник: Zoi Environment Network, 2010

Социально-экономическое развитие Центральной Азии в значительной степени зависит от ресурсов пресной воды, при этом страны связаны между собой трансграничными водными ресурсами (Абдуллаев и соавт., 2019). Около 6000 рек берут своё начало в горных районах, питаются в основном за счёт таяния снега и ледников с хребтов Памир, Гиндукуш и Тянь-Шань (Духовный и соавт., 2014; Djumaboev et al., 2019; Armstrong et al., 2019). Амударья и Сырдарья — крупные реки региона, вносящие значительный вклад в бассейн Аральского моря (таблица 1.3.1), однако их приток в Аральское море сократился примерно на 90 % в связи с ростом потребности в воде и изменением климата (Сафронова, 2009; Djumaboev et al., 2019). Таджикистан и Кыргызстан являются основными поставщиками воды в эти реки, в

значительной степени зависящими от таяния ледников и снежного покрова (Saks et al., 2022; Aizen et al., 1995). В то время как роль таяния снега и ледников хорошо изучена, роль вечной мерзлоты как источника водных ресурсов остаётся малоизученной. Водные ресурсы Казахстана в основном представлены поверхностными водами, при этом они в значительной степени зависят от внешних источников (Karatayev et al., 2017a). Сельское хозяйство потребляет около 75% водных ресурсов (Достай, 2012; Медеу и соавт., 2020). В Кыргызстане насчитывается более 3500 рек, при этом значительная часть воды используется для орошения (почти 95%), а промышленное и хозяйственно-питьевое водопотребление незначительно (Осмонбетова, 2021). 84% общего потребления воды в Таджикистане используется в сельском хозяйстве

(Toderich, 2004). Туркменистан в основном зависит от Амударьи, а забор воды регулируется международными соглашениями. Сельское хозяйство является крупнейшим потребителем, на него приходится более 90% водопотребления (Zonn, 2012). Узбекистан полагается на воды Амударьи и Сырдарьи, при этом на ирригацию приходится около 86% водопотребления (Государственный водный кадастр Узбекистана, 2014). Афганистан является ключевым поставщиком воды в Амударью, поскольку река берёт начало из озера Зоркуль в пределах его границ. Однако из-за ограниченного развития сельского хозяйства и промышленности, в значительной степени обусловленного

десятилетиями конфликта, Афганистан исторически использовал лишь небольшую долю воды реки по сравнению со своими соседями по Центральной Азии. В 2022 году Афганистан приступил к реализации проекта строительства оросительного канала Кош-Тепа, что вызвало серьёзную обеспокоенность, в частности со стороны Узбекистана, поскольку это может иметь последствия для отрасли сельского хозяйства страны. В целом, распределение и управление водными ресурсами в Центральной Азии — сложный процесс, на который влияют изменчивость климата, экономическое развитие и межстрановые соглашения.

Таблица 1.3.1. Состав и объём основных ресурсов поверхностных вод Центральной Азии

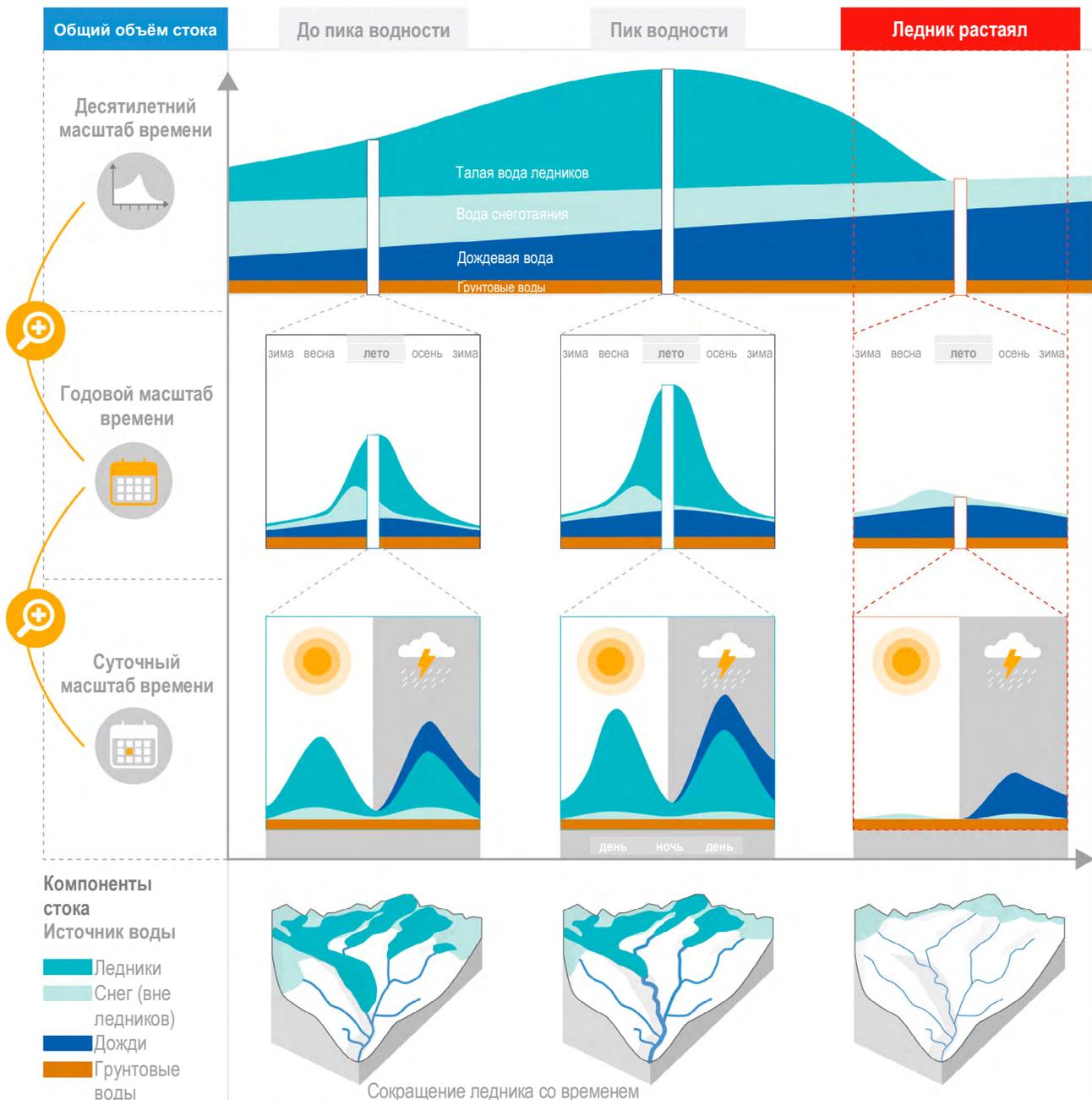
Страна	Бассейн Амударьи км ³ /год	Бассейн Сырдарьи км ³ /год	Бассейн Аральского моря км ³ /год	%
Казахстан	-	4,50	4,50	3,90
Кыргызстан	1,90	27,40	29,30	25,30
Таджикистан	62,90	1,10	64,00	55,40
Туркменистан	2,78	-	2,78	2,40
Узбекистан	4,70	4,14	8,84	7,60
Афганистан	6,18	-	6,18	5,40
Центральная Азия	78,46	37,14	115,60	100,00

Источник: Сафронова, 2009

Изменение климата представляет угрозу для ледникового льда и водных ресурсов (рис. 1.1.2). Быстрое изменение состояния ледников повлияет на гидрологический режим горных водосборов: как смоделировали Хусс и Хок (Huss and Hock, 2018), ожидается, что годовой сток достигнет максимума (из-за усиления таяния), а затем будет уменьшаться по мере отступления ледников. Время наступления такого «пика водности» определяется современными объёмами льда (как в абсолютном выражении, так и по отношению к площади водосбора). Прогнозы предполагают

увеличение стока талых вод криосферы весной и летом, что в сочетании с обильными дождями может привести к наводнениям в результате прорыва ледниковых озёр, селевыми потоками и оползням, наносящим ущерб населённым пунктам и сельскому хозяйству (Kaser et al., 2010; Huss and Hock, 2018; Bolch et al., 2011; Erokhin et al., 2018). И наоборот, сток в засушливые летние месяцы может неуклонно сокращаться к концу столетия из-за уменьшения объёма ледников (Hagg et al., 2007; Hagg et al., 2013; Huss and Hock, 2018; Kure et al., 2013).

Рисунок 1.1.2. Схематическое изображение ожидаемых изменений стока при текущем ходе изменения климата: а) влияние на общий вклад талых вод ледников и б) сезонность водообеспеченности



Источник: IPCC, 2021

Эти прогнозы подчёркивают необходимость эффективного управления водными ресурсами и мониторинга баланса массы ледников в регионе. Продолжающиеся с 2010 года усилия направлены на восстановление практики мониторинга ледников *in situ*, что

помогает валидации результатов модельных исследований и региональных оценок поведения ледников и их влияния на ресурсы пресной воды в Центральной Азии (Hoelzle et al., 2017, 2019; Schöne et al., 2013).

▶ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ



2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе мы опираемся на существующие региональные результаты моделирования баланса массы ледников, отступления ледников и стока, полученные с помощью Глобальной модели эволюции ледников (Global Glacier Evolution Model, GloGEM), разработанной Университетом Фрибурга и ETH Zürich. GloGEM — это процессно-ориентированная модель, которая учитывает все гляциологические процессы и нацелена на применение во всём мире, хотя и рассчитывает конкретно отдельные ледники (Huss & Hock, 2015, 2018; Zekollari et

al., 2019; Compagno et al., 2022). Для целей настоящего анализа мы анализируем результаты GloGEM, связанные с исследованием Боссонса и соавторов (Bossons et al., 2023), для регионов 13 и 14 Рэндольфского кадастра ледников (Randolph Glacier Inventory, RGI), включающих горные хребты Тянь-Шань и Памир. Ниже мы приводим краткое описание используемых данных и методов. Подробное описание модели можно найти в соответствующих публикациях (Huss & Hock, 2015, 2018; Bosson et al., 2023).

2.1. ДАННЫЕ

Данные о **начальной протяжённости зоны обледенения**, относящиеся примерно к 2000 году, получены из Рэндольфского кадастра ледников версии 6.0 (RGI, 2017). Гипсометрия поверхности для каждого ледника получена на основе пересечения контуров с цифровыми моделями рельефа Радиолокационной топографической миссии шаттла (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) (Jarvis et al., 2008). Для каждого ледника используется дискретизация на зоны высот поверхности с шагом 10 м. Топография подстилающей породы получена на основе консенсуса данных пяти моделей толщины льда (Farinotti et al., 2019). Эти модели толщины льда соответствуют подходу к оценке объёмного потока льда и принципам гидродинамической модели. При оценке в глобальном масштабе рассчитанные толщины хорошо согласуются с данными наблюдений (Farinotti et al., 2019).

Работа Хьюгоннет и соавторов (Hugonnet et al., 2021) стала источником данных **наблюдений за изменением объёма льда каждого ледника** в период с 2000 по 2020 год с использованием данных из нескольких источников для оценки глобальной потери массы ледников. Для расчёта геодезических балансов массы ледников в исследуемом регионе за период с 2000 по 2020 год авторы опирались в первую очередь на данные о высоте

рельефа со спутника «усовершенствованный космический термозэмиссионный и отражающий радиометр» (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER). Хотя наблюдения со спутников, включая ASTER и CryoSat-2, обеспечивают ценные данные измерений высоты, временной охват может быть непоследовательным, что приводит к потенциальным пробелам при анализе (Nakamura et al., 2006). Кроме того, разрешение и качество спутниковых снимков могут влиять на точность этих измерений, что приводит к значительным неопределённостям в оценках изменения объёма льда на основе этого набора данных, особенно для более коротких временных интервалов (Hugonnet et al., 2021). Тем не менее, этот набор данных остаётся одним из наиболее последовательных и полных для целей оценки изменения объёма ледников за последние два десятилетия в глобальном масштабе.

Для проверки модели использовались данные наблюдений за балансом массы поверхности, полученные в результате **измерений in situ** на отдельных ледниках, предоставленные Всемирной службой мониторинга ледников (WGMS, 2022). Однако для Центральной Азии эти наблюдения носят весьма ограниченный характер с точки зрения пространственного и временного охвата, что затрудняет надёжную

проверку модели для Тянь-Шаня и Памира, особенно учитывая полное отсутствие данных наблюдений для некоторых субрегионов (Barandun et al., 2021).

Для прогноза будущих событий мы используем **климатические временные ряды** месячных показателей температуры воздуха и количества осадков по сетке с шагом 2 м, полученные с помощью цепочки из 56 климатических моделей (на базе 13 различных МОЦ) в рамках Фазы 6 проекта взаимного сравнения связанных моделей (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) (Eyring et al., 2016). Результаты расчётов МОЦ построены на основе трёх различных сценариев общих социально-экономических путей (Shared Socioeconomic Pathways, SSP), описывающих возможное будущее влияние на климат различных уровней выбросов парниковых газов (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) (Meinshausen et al., 2020). Сценарии разработаны на основе ряда прогнозов будущего роста населения, научно-технического развития и реакции общества (Meinshausen et al., 2011).

В **сценарии SSP1-2.6**, который представляет собой путь с низким уровнем выбросов для достижения значительного смягчения воздействий изменения климата, радиационное воздействие, согласно прогнозам, увеличится примерно на 2,6 Вт/м² к 2100 году по сравнению с доиндустриальным уровнем (IPCC, 2021). В этом сценарии особое внимание уделяется ориентации на устойчивое развитие, жёсткой климатической политике и переходу на возобновляемые источники энергии (Riahi et al., 2017).

Сценарий SSP2-4.5 представляет собой путь со средним уровнем выбросов парниковых газов. Он предполагает увеличение радиационного воздействия примерно на 4,5 Вт/м² к 2100 году по сравнению с доиндустриальным уровнем (IPCC, 2021). В этом сценарии основное внимание уделяется обеспечению устойчивости при умеренном смягчении последствий изменения климата и адаптации к ним (Riahi et al., 2017).

Согласно **сценарию SSP5-8.5**, который представляет собой путь высоких выбросов, к 2100 году радиационное воздействие увеличится примерно на 8,5 Вт/м² по сравнению с доиндустриальным уровнем (IPCC, 2021). Этот сценарий характеризуется быстрым экономическим ростом, значительной зависимостью от ископаемого топлива и ограниченными усилиями по смягчению последствий изменения климата, что приведёт к значительным уровням выбросов парниковых газов (Riahi et al., 2017).

Климатические временные ряды корректируются с использованием сетки месячных данных о температуре воздуха и осадках из реанализа ERA5, который обеспечивает комплексное представление климата и погодных условий прошлого (Hersbach et al., 2020). Для каждого ледника рассчитываются аддитивные (для температуры) и мультипликативные (для осадков) месячные смещения между ближайшей ячейкой сетки ERA5 и соответствующей ячейкой сетки МОЦ для данного ледника за период с 1980 по 2020 год. Эти смещения затем корректируются для учёта высотного распределения ледников с использованием постоянных градиентов осадков и температуры. В течение прогнозного периода рассчитанные смещения, которые, как предполагается, остаются неизменными с течением времени, накладываются на ряды МОЦ. Для дальнейшего уточнения данных значения температуры воздуха в МОЦ были скорректированы для учёта расхождений в годовой изменчивости между временными рядами ERA5 и МОЦ (Huss and Hock, 2015). Эта корректировка имеет решающее значение для обеспечения достоверности калиброванных параметров модели таяния, используемых в прогнозах на основе МОЦ. Однако существенным ограничением является неопределённость в распределении изменчивости, представленной средствами реанализа, которая может вносить погрешности в скорректированные временные ряды МОЦ и в конечном итоге способствовать высокой неопределённости в прогнозах.

2.2. МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ЛЕДНИКОВ И ЕЁ КАЛИБРОВКА

Прогнозы будущих изменений объёма ледников и высвобождения талой воды были сделаны с помощью Глобальной модели эволюции

ледников GloGEM (например, Hock and Huss, 2015, 2018, Compagno et al., 2021, 2022, Bosson et al., 2023). GloGEM — это модель для расчёта

баланса массы и связанных с ним изменений геометрии каждого ледника мира. Модель описывает основные процессы, определяющие климатический баланс массы (Huss and Hock, 2015). Модель работает с высотными зонами с шагом 10 м в масштабе каждого отдельного ледника в регионе и имеет месячное временное разрешение, включая параметризацию суб-месячной изменчивости температуры воздуха (Huss & Hock, 2015). Климатический баланс массы — это чистое изменение массы ледника за определённый период времени, обычно оцениваемое за год или сезон. Он является важнейшим показателем реакции ледника на изменчивость климата и используется здесь для моделирования изменения объёма ледника. Климатический баланс массы можно выразить как сумму всех процессов аккумуляции и абляции. Процессы аккумуляции — это все процессы, которые способствуют увеличению массы ледника. Процессы абляции — это все процессы, которые приводят к уменьшению массы ледника. В Центральной Азии аккумуляция происходит в основном за счёт осадков в виде снега, снежных наносов, повторного замерзания талых вод и схода лавин. Доминирующим процессом абляции является таяние, за которым следует сублимация в районах с преобладанием солнечного излучения. Скорость таяния и сублимации определяется температурой воздуха, интенсивностью солнечной радиации, альбедо поверхности и градиентом водного потенциала между поверхностью и атмосферой (Cuffy and Patterson, 2010).

Для расчёта показателя таяния используется традиционная модель температурного индекса, которая позволяет проводить различие между процессами таяния снега и таяния льда с помощью двух различных эмпирических коэффициентов (Hock, 2003). Для моделирования накопления массы используется показатель количества твёрдых осадков как функция высоты над уровнем моря и температуры воздуха (Huss et al., 2009). Таким образом, модель относительно проста и в значительной степени зависит от того, что связь между температурой воздуха и таянием является линейной и постоянной во времени. Как правило, снег и лёд начинают таять, когда температура воздуха превышает 0 °C. Скорость таяния пропорциональна температуре воздуха и зависит от эмпирического коэффициента (градусо-суток). Эти коэффициенты различны для поверхностей снега или льда. Как правило, коэффициент градусо-суток выше для льда, что означает, что лёд тает быстрее снега при той же температуре из-за более низкого альбедо и, следовательно, большего поглощения энергии.

Твёрдые осадки выпадают, когда температура воздуха у поверхности превышает определённый порог, обычно 1,5 °C. При соблюдении этого условия на леднике осадки регистрируются как накопление. Замораживание жидкой воды в снеге или фирне при отрицательных температурах моделируется на основе показателей теплопроводности и латентного теплообмена (Huss & Hock, 2015). Другие процессы, такие как приrost или потеря массы в результате схода лавин, в явном виде не рассматриваются, но неявно учитываются при калибровке на основе данных о конкретном леднике. Эффектами воздействия солнечной радиации, выходящими за рамки процессов таяния льда и снега, пренебрегаем. Предполагается, что все процессы и связанные с ними эффекты ответной реакции находятся в устойчивой зависимости и в течение следующих 100 лет будут реагировать как при современных условиях. В модели не учитывается базальный баланс массы. Хотя в GloGEM есть модуль, учитывающий влияние и пространственно-временную динамику надледникового обломочного покрова (Compagno et al., 2022), в данной версии модели он не использовался. Явления пульсации ледников также не рассматриваются. Для определения коэффициента градусо-суток и модели замерзания необходимо задать тип поверхности (снег, фирн, лёд). Согласно Хоку и Хуссу (Hock and Huss, 2015), в начале процесса моделирования тип поверхности задаётся на конец лета путём установки фирновой линии по отметке средней высоты ледника, а ниже — голый лёд. В течение всего года моделирования тип поверхности обновляется ежемесячно для каждой высотной зоны на основе климатического баланса массы. Если суммарный баланс положительный, поверхность назначается снегом. И наоборот, если он отрицательный, что указывает на то, что весь снег растаял, поверхность классифицируется как голый лёд или фирн. Поверхность классифицируется как фирн, если среднегодовой баланс за последние пять лет положительный, в противном случае поверхность классифицируется как лёд. Этот метод обеспечивает эффективную аппроксимацию пространственных и временных вариаций площади фирнового покрова, не требуя полной модели уплотнения фирнового покрова (Huss and Hock, 2015).

Динамическая реакция каждого ледника на изменение массы моделируется с помощью эмпирической зависимости, которая описывает изменение толщины слоя льда как функцию нормализованного диапазона высот (Huss et al., 2010). В конце каждого масс-балансового

года модель корректирует толщину, уровень высоты поверхности и протяжённость ледника в зависимости от рассчитанного для этого года общего изменения массы соответствующего ледника. Предыдущие оценки показывают, что такой параметризованный подход к моделированию трёхмерной эволюции ледников хорошо согласуется с более сложным ледодинамическим моделированием (Huss et al., 2010). Более подробную информацию об описании модели и параметризации различных процессов, учитываемых в GloGEM, см. в работе Хусса и Хока (Huss and Hock, 2015).

Сток рассчитывается как сумма таяния снега/льда и жидких осадков минус повторное замерзание на виртуальной водосборной площади, которая соответствует начальной протяжённости каждого отдельного ледника. В начале периода моделирования этот водосбор на 100% покрыт ледником, но в процессе отступления ледника он превращается в бассейн с частичным ледниковым покровом. Таким образом, данный подход позволяет рассмотреть стабильную область формирования стока, т. е. верховья крупных водотоков, но не позволяет напрямую судить о более масштабных гидрологических процессах, включающих также фактор растительного покрова и динамику грунтовых вод, которые могут быть рассмотрены только с помощью полной гидрологической модели.

Одной из основных проблем, стоящих перед региональными и глобальными моделями ледников, является их калибровка. Этот процесс крайне важен, поскольку ни даунскейлинг метеорологических переменных не позволяет точно отразить условия на конкретном участке, ни модели ледников не могут эффективно и точно отразить сложные процессы, влияющие на каждый ледник (Huss and Hock, 2015). Большинство глобальных моделей ледников опираются на данные измерений баланса массы *in situ* в качестве основного источника калибровочных данных (Radić and Hock, 2011; Giesen and Oerlemans, 2013). В некоторых исследованиях параметры модели были дополнительно уточнены для согласования с оценками региональных изменений массы, полученными на основе экстраполированных наблюдений за ледниками (Radić et al., 2014). Однако калибровка такой модели для Центральной Азии с использованием данных баланса массы отдельных ледников *in situ* сопряжена с определёнными трудностями. Прямые наблюдения часто ограничены относительно небольшими ледниками,

а регионы со значительным ледяным покровом часто недостаточно охвачены наблюдениями (Huss and Hock, 2015). Таким образом, модель GloGEM была откалибрована для каждого ледника отдельно по данным наблюдений дистанционного зондирования за изменением объёма льда в период с 2000 по 2019 год (Hugonnet et al., 2021) в соответствии с многоступенчатой процедурой калибровки (Huss and Hock, 2015). Если смоделированный баланс удельной массы всего ледника согласуется с балансом, представленным в работе Хьюгоннета и соавторов (Hugonnet et al., 2021), в пределах порога $\pm 0,1$ м водного эквивалента в год, считается, что ряды данных метеорологических воздействий хорошо описывают климатические условия для данного ледника. Таким образом, калибровка интерпретируется как второй шаг даунскейлинга, который устраняет влияние неточностей, присущих средствам моделирования региональных климатических воздействий (Bosson et al., 2023). Моделируемые компоненты баланса массы были детально проверены с помощью независимых наблюдений (например, баланс массы, изменение площади) (Huss and Hock, 2015, 2018). Модель воспроизводит независимые наборы данных наблюдаемого баланса массы по всему миру (WGMS, 2022), как для годовой потери массы ледников, так и для сезонных компонентов, а также в зависимости от высоты (Bosson et al., 2023).

После калибровки модели на период с 2000 по 2020 год она запускается с данными реанализа ERA5 на период с 1980 по 2020 год, а затем с данными МОЦ до 2100 года. Затем оцениваются изменения баланса массы для всех районов за период с 1980 по 2100 год. Прогнозы будущего отступления ледников, выполненные с помощью GloGEM, обеспечивают данные об изменениях баланса массы, площади, объёма и стока ледников в месячном/годовом разрешении для каждого района (Тянь-Шань/Памир) до 2100 года.

Границы водосборных бассейнов для определения вклада талых вод ледников определяются в соответствии с гидрологическим маршрутом в цифровой модели рельефа поверхности (табл. 2.2.1 и 2.2.2) (Ehlschlaeger, 1989). Водосборные бассейны включают все крупнейшие реки, вносящие вклад в сток Амударьи и Сырдарьи, а также другие крупные независимые реки Центральной Азии (такие как Зеравшан) и бессточные бассейны озёр Иссык-Куль в Кыргызстане и Каракуль в Таджикистане. Чтобы повысить достоверность результатов, для каждого водосбора мы взяли медианный результат моделирования GloGEM для 13 МОЦ.

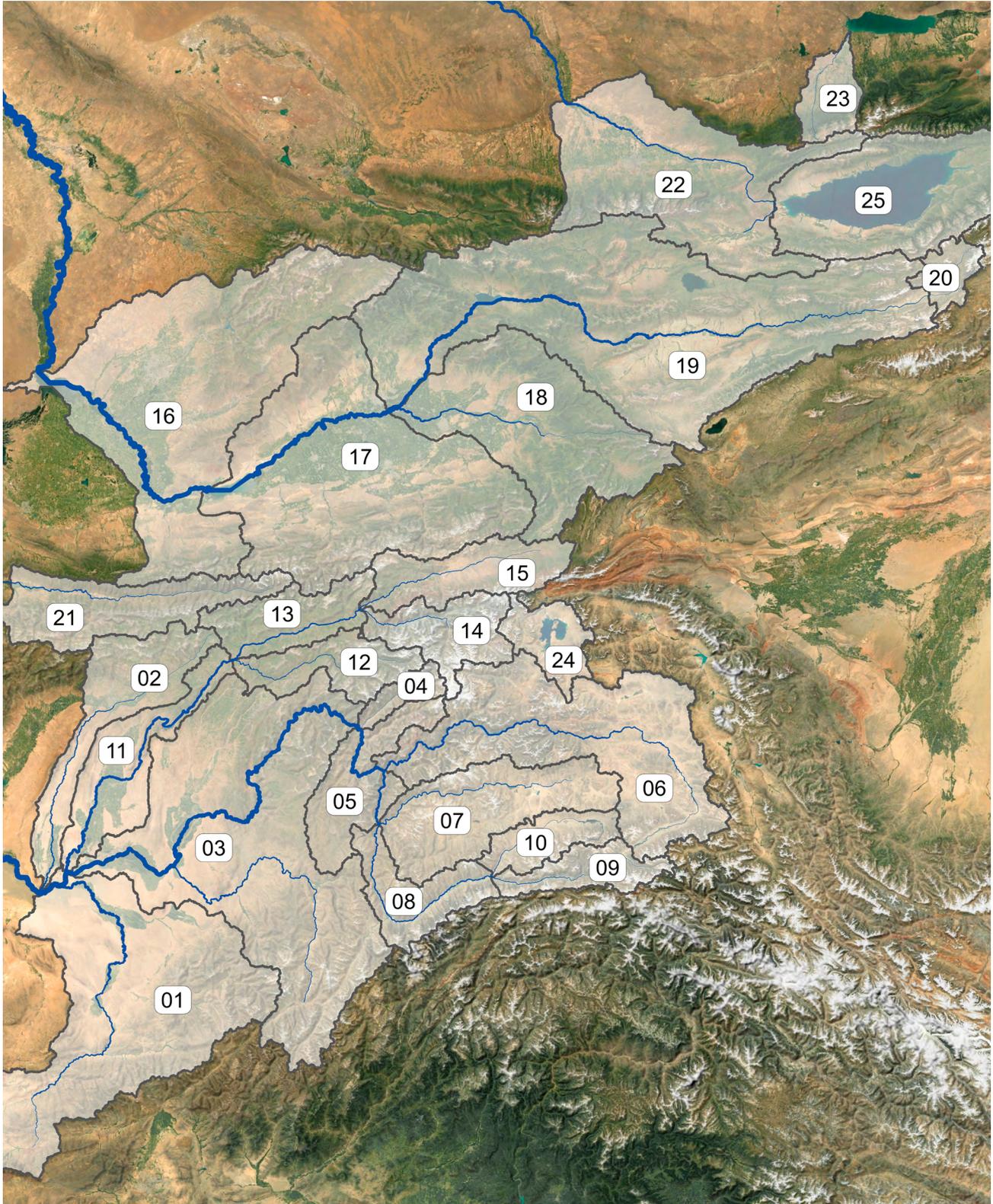
Таблица 2.2.1. Описание каждого водосбора, использованного для расчёта изменения объёма льда и вклада талых вод ледников в общий речной сток.

№	Название водосбора	Описание	Охват	Другие водосборные бассейны выше по течению, которые вносят вклад талой воды в данный водосбор
01	Амударья	Амударья ниже притока Кафирниган	Прочее: только на территории Афганистана	02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15
02	Кафирниган	Кафирниган	Ледники: Якарча; города: Душанбе	
03	Пяндж	Пяндж выше слияния с Вахшем	Города: Кулоб	04, 05, 06, 07, 08, 09, 10
04	Ванчоб	Ванчоб	Ледники: Медвежий	
05	Пяндж	Пяндж выше притока Ванчоб	Ледники: Язгулемский	06, 07, 08, 09, 10
06	Бартанг	Бартанг	Города: Мургаб; прочее: Сарезское озеро	
07	Гунт	Гунт	Ледники: № 457; города: Хорог	
08	Пяндж	Пяндж выше притока Гунт	Города: Ишкашим	09, 10
09	Вахан	Вахан	Прочее: Ваханский коридор	
10	Памир	Памир	Прочее: Ваханский коридор	
11	Вахш	Вахш выше слияния с Пянджем	Прочее: Нурекское водохранилище	12, 13, 14, 15
12	Хингов	Хингов	Ледники: Гармо	
13	Вахш	Вахш выше притока Хингов	Прочие: Алайский хребет на юге	14, 15
14	Муксу	Муксу	Ледники: Федченко, Кызылсу; прочее: пик Ленина на юге	
15	Кызылсу	Кызылсу	Ледники: Абрамова; прочее: Алайская долина, пик Ленина на севере	
16	Сырдарья	Сырдарья в районе Шардаринского водохранилища	Ледники: Баркрак; города: Худжанд, Ташкент; прочее: Шардаринское водохранилище	17, 18, 19, 20
17	Сырдарья	Сырдарья в районе Кайраккумского водохранилища	Города: Коканд; прочее: Ферганская долина, Кайраккумское водохранилище, Алайский хребет на севере	18, 19, 20
18	Карадарья	Карадарья	Города: Узген, Андижан	
19	Нарын	Нарын выше слияния с Карадарьёй	Города: Нарын; прочее: Токтогульское водохранилище	20
20	Карасай	Карасай	Ледники: Батыш-Сук, Григорьева, № 354, Сары-Тор, Борду; прочее: рудник Кумтор	
21	Зеравшан	Зеравшан	Ледники: Зеравшанский, ГГП	
22	Чу	Чу	Ледники: Голубинского; города: Бишкек	
23	Каскелен	Каскелен	Ледники: Туюксу; города: Алматы	
24	Каракуль	Каракуль	Ледники: Зульмарт, Кон-Чукурбаши; прочее: озеро Каракуль	
25	Иссык-Куль	Иссык-Куль	Ледники: № 599, Кара-Баткак, Тургень-Аксу; прочее: озеро Иссык-Куль	

Таблица 2.2.2. Общая площадь водосбора, совокупная общая площадь водосбора, включая водосборы верховий, площадь оледенения в каждом водосборе, совокупная площадь оледенения с учётом водосборов верховий и площадь оледенения в водосборе и с учётом водосборов верховий в процентах.

№	Название водосбора	Общая площадь водосбора (км ²)	Совокупная общая площадь (км ²)	Площадь оледенения (км ²)	Совокупная площадь оледенения (км ²)	Площадь оледенения (%)	Совокупная площадь оледенения (%)
01	Амударья	41 363	208 328	98	9714	0,24	4,66
02	Кафирниган	11 347	11 347	93	93	0,82	0,82
03	Пяндж	48 416	116 795	741	5538	1,53	4,74
04	Ванчоб	2096	2096	342	342	16,34	16,34
05	Пяндж	8469	66 283	449	4455	5,31	6,72
06	Бартанг	28 014	28 014	1684	1684	6,01	6,01
07	Гунт	13 690	13 690	651	651	4,76	4,76
08	Пяндж	6812	16 110	620	1671	9,10	10,37
09	Вахан	4755	4755	725	725	15,25	15,25
10	Памир	4544	4544	326	326	7,17	7,17
11	Вахш	9808	38 823	0	3985	0,00	10,26
12	Хингов	6577	6577	843	843	12,82	12,82
13	Вахш	7186	22 437	384	3142	5,34	14,00
14	Муксу	6920	6920	2177	2177	31,46	31,46
15	Кызылсу	8330	8330	580	580	6,97	6,97
16	Сырдарья	44 379	168 648	154	1852	0,35	1,10
17	Сырдарья	40 302	124 269	603	1698	1,50	1,37
18	Карадарья	23 198	23 198	78	78	0,34	0,34
19	Нарын	58 112	60 769	707	1017	1,22	1,67
20	Карасай	2657	2657	310	310	11,67	11,67
21	Зеравшан	11 741	11 741	562	562	4,79	4,79
22	Чу	26 886	26 886	358	358	1,33	1,33
23	Каскелен	3868	3868	40	40	1,04	1,04
24	Каракуль	4467	4467	384	384	8,59	8,59
25	Иссык-Куль	21 934	21 934	502	502	2,29	2,29

Рисунок 2.2.1. Географическое положение водосборных бассейнов по номерам из таблицы 2.2.1.



2.3. АСПЕКТЫ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наши результаты относительно будущего отступления ледников подвержены значительной неопределённости. Несмотря на то, что комбинированные исследования с помощью моделирования и дистанционного зондирования позволили реконструировать реакцию криосферы на изменение климата в масштабах региона в прошлом (например, Barandun et al., 2021; Gruber, 2012; Mankin & Diffenbaugh, 2015, Van Tricht et al., 2021, Farinotti et al., 2015), прогнозы на будущее опираются на модели, построенные на современных данных о криосфере. В отношении регионов с небольшим количеством данных существует целый ряд аспектов неопределённости, поэтому к интерпретации результатов следует подходить с осторожностью. Доминирующим источником неопределённости при моделировании поведения криосферы являются факторы метеорологических воздействий. Будущие прогнозы изменений криосферы зависят от результатов прогнозирования климатических факторов, полученных с помощью даунскейлинга глобальных климатических моделей (ГКМ/МОЦ) (Hock et al., 2019). Пространственное разрешение МОЦ (100–300 км) может привести к значительным отклонениям в моделируемых климатических данных для топографически сложных районов, где поверхностные и подповерхностные условия могут сильно различаться на коротких горизонтальных расстояниях (Gubler et al., 2011). В последнее время для Центральной Азии были разработаны некоторые региональные климатические модели, позволяющие получать значения региональных климатических полей с более тонким разрешением в несколько десятков километров (Ozturk et al., 2012; Russo et al., 2019). В отличие от задачи понимания крупномасштабной циркуляционной системы, оценка климатических условий регионального и местного масштаба остаётся очень сложной (Zandler et al., 2019). Для моделирования местных склоновых процессов необходимы непрерывные климатические поля высокого разрешения (10–100 м). Таким образом, неопределённости остаются значительными, особенно в отношении уровней осадков. В этом контексте результаты реанализов атмосферных моделей с пространственным разрешением, как правило, в диапазоне 10–50 км, представляют собой важный источник данных для восполнения недостатка текущей климатической информации и корректировки возможных погрешностей в будущих симуляциях (например,

Pereira-Cardenal et al., 2011; Maussion et al., 2014). В основном для этого требуется предварительный даунскейлинг для повышения репрезентативности моделей местного масштаба с использованием данных наземных станций. Проблема заключается в отсутствии метеорологических данных *in situ* для оценки качества и отклонений представлений климатического воздействия (Unger-Shayesteh et al., 2013).

В настоящее время приоритетной задачей является получение адекватных климатических временных рядов для моделирования климата в прошлом, настоящем и будущем. Использование инверсных методов и косвенных параметров, таких как состояние снежного покрова (Molotch, 2010; Margulis et al., 2015; Aalstad et al., 2018) или баланс массы ледников (Immerzeel et al., 2015), могут способствовать сокращению отклонений (например, поля осадков). Преимуществом методов ассимиляции данных на основе ансамбля является непосредственная количественная оценка неопределённостей, связанных с факторами воздействия, образцами и моделями (Fiddes et al., 2019). Эти направления исследований необходимо продвигать применительно к Центральной Азии.

Боссон и соавторы (Bosson et al., 2023) рассмотрели влияние неопределённостей, обусловленных: 1) сценариями выбросов парниковых газов; 2) прогнозами МОЦ; 3) данными о начальной площади ледника, толщине льда и прошлых изменениях состояния ледника; и 4) упрощениями в модели ледника и процедуре калибровки. Они выделили пять ключевых элементов, вносящих вклад в общую неопределённость модели эволюции ледников, и повторно запустили её с учётом консервативных допущений, чтобы изучить влияние этих элементов на конечные результаты. Эксперименты были направлены на изучение влияния: 1) неопределённости в геодезическом балансе массы для конкретного ледника; 2) выбранного периода калибровки (2000–2019 г. по сравнению с 2000–2009 г. или 2010–2019 г.); 3) поправочного коэффициента осадков для каждого ледника; 4) коэффициентов таяния снега и льда; и 5) неопределённости в начальном объёме ледника (Farinotti et al., 2019; Milan et al., 2022). Отдельные факторы воздействия на будущий объём ледникового льда были объединены в интегрированную неопределённость с помощью суммы корней квадратов. Для оценки неопределённостей

в данных моделях Боссон и соавторы (Bosson et al., 2023) предположили, что эти неопределённости независимы для разных ледников. Однако они отметили, что неопределённости в моделях ледников к концу XXI века будут ограничены полной потерей небольших ледников, независимо от допущений модели (Bosson et al., 2023). Региональные результаты показали, что различия во внешних воздействиях сценариев SSP и разброс между результатами МОЦ, использующими один и тот же сценарий SSP, являются доминирующими источниками неопределённости в прогнозируемой эволюции объёма ледников в течение столетия, что согласуется с выводами предыдущих исследований (Marzeion et al., 2020). Дополнительные факторы неопределённости, особенно систематические ошибки, трудно оценить в глобальном масштабе, и они могут потребовать дальнейшего изучения, например, даунскейлинга метеорологических переменных и решения проблемы равнозначности параметров при калибровке моделей (Rounce et al., 2023; Comragno et al., 2021).

Важно признать ограничения моделей будущего баланса массы ледников, особенно тех, которые используют подходы, основанные на температурных индексах. Эти модели часто используют упрощённые представления процессов, которые не учитывают нелинейную реакцию ледников и их механизмов ответной реакции на изменение атмосферных условий. Например, при повышении температуры воздуха обнажение фирна в сезон абляции может увеличиться из-за полного истощения снежного покрова. Этот сдвиг может изменить альбедо поверхности, способность к повторному замерзанию и, таким образом, в определённой степени повлиять на скорость таяния. Различные балансы масс и процессы, связанные с изменением состояния поверхности фирна, пока недостаточно хорошо изучены, и поэтому их трудно учесть в прогнозах будущих изменений (Machguth et al., 2023, Kronenberg et al., 2022). Аналогичным образом не учитываются пространственные и временные неоднородности альбедо (Naegeli et al., 2019, Volery et al., принято к публикации). Кроме того, изменения в климатических режимах могут изменить чувствительность фактора баланса массы, сместить реакцию ледников от абляции с преобладанием сублимации к абляции с преобладанием таяния или изменить режимы повторного замерзания. Возрастающая частота выпадения осадков на ледниках добавляет ещё один уровень сложности, поскольку тепловые эффекты этих осадков также не учитываются в таких моделях. Упрощение и упущение многих сложных процессов и эффектов ответной реакции может кардинально повлиять на реакцию ледников на изменение климата.

Многие из этих взаимодействий не до конца изучены и не представлены в существующих моделях, что приводит к значительным неопределённостям

в сценариях будущих изменений объёма льда и вклада талых вод ледников. Следовательно, результаты работы этих моделей следует интерпретировать с осторожностью и как тенденции, а не как точные количественные показатели изменений. Новые наборы данных о толщине ледника, полученные на основе многомодельных подходов и подтверждённые обширными данными локальных наблюдений (Rounce et al., 2023, Farinotti et al., 2019, Welty et al., 2020), позволили уменьшить неопределённость в понимании текущего состояния толщины ледникового покрова и, соответственно, будущего рельефа горных пород по сравнению с предыдущими оценками.

Расчёт вклада талых вод ледников в различные водосборные бассейны требует тщательного изучения границ водосбора и маршрутизации рек, которые могут не соответствовать текущему рельефу поверхности. Неточная маршрутизация может привести к значительным ошибкам в оценке вклада талых вод ледников для конкретных бассейнов. В качестве примера можно привести ледник Федченко, один из крупнейших ледников за пределами полярных регионов. Для точного прогноза поступления талых вод в речные системы Памира крайне важно понимать особенности будущего водосбора для талых вод.

В настоящее время озеро Танымас, образованное ледяной плотиной ледника Танымас-5, принимает талые воды с ледника Федченко. Площадь озера составляет 1 км², и оно имеет пути стока в два разных водосбора: на восток в сторону реки Пяндж или на север в сторону реки Вахш. Такая ситуация усложняет отнесение объёмов льда и стока к соответствующим водосборам, особенно в прогнозах будущих изменений. Хотя существует вероятность того, что ледяная плотина отступит значительно раньше ледника Федченко, ожидается снижение уровня как ледника, так и озера. Хотя непосредственное влияние на распределение объёмов льда минимально, относительная значимость объёма ледника Федченко в стоке будет возрастать до 2100 года, поскольку другие ледники в регионе отступают быстрее.

Существует множество ограничений, связанных с моделированием будущих изменений, но используемая здесь модель эволюции ледников — это первый шаг к прогнозированию будущей реакции ледников на изменение климата и улучшению понимания грядущих изменений в криосфере и их влияния на обеспеченность водными ресурсами. Вопросы, связанные с криосферой, будут становиться всё более актуальными в контексте будущих изменений климата и потребуют лучшего понимания криосферных процессов для совершенствования моделирования с помощью долгосрочных наблюдений.

▶ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В БУДУЩЕМ



3. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В БУДУЩЕМ

3.1. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В БУДУЩЕМ

На рисунках 3.1.1 и 3.1.2 показаны изменения температуры воздуха и количества осадков к концу столетия для трёх различных сценариев, опубликованных в работе Зигфрида и соавторов (Siegfried et al., 2024).

■ **КАЗАХСТАН.** Согласно прогнозам, температура приземного воздуха в Казахстане будет продолжать расти во все сезоны, и к середине столетия она увеличится на 2,3–2,6 °C по сценарию SSP2-4,5 и на 3,0–3,5 °C по сценарию SSP5-8,5. К концу века можно ожидать потепления на 3,3–3,9 °C и 6,2–7,3 °C соответственно. По сценарию самых высоких выбросов прогнозируется повышение температуры более чем на 6 °C, что подчёркивает необходимость контроля над глобальными выбросами для смягчения последствий потепления. Ожидается, что потепление будет более выраженным в северных регионах, а вероятность возникновения периодов сильной жары значительно возрастёт при сценарии с высоким уровнем выбросов (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022). Прогнозы указывают на увеличение годового количества осадков в среднем на 7–8 % к середине века, к концу века — в диапазоне 11–14 %. Однако изменение в годовых суммах осадков по территории неравномерное: на западе увеличение ожидается менее чем на 10 %, а на юго-востоке — более чем на 20 %. Сезонные колебания показывают значительное увеличение количества осадков зимой (на 20–35%) и уменьшение в летний период (в среднем на 12 %), при этом экстремальные осадки, вероятно, усилятся

(8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022).

■ **КЫРГЫЗСТАН.** В среднем по Кыргызстану в 2100 году ожидается повышение температуры на 6,1 °C по среднему сценарию (SSP2-4.5) и на 4,7 °C по мягкому сценарию (SSP1-2.6). При пессимистичном сценарии (SSP5-8.5) волны жары и другие экстремальные климатические явления будут представлять серьёзную угрозу для экосистемы и значительно ухудшат условия жизни в затронутых районах (Абдырасуова и соавт., 2011). По оценкам, при повышении глобальной температуры на 2 °C волны тепла будут усиливаться, и 20–30 % летних периодов будут значительно теплее, а при повышении глобальной температуры на 4 °C 50–80 % летних периодов будут значительно жарче в последней четверти XXI века (Reyer et al., 2015). По прогнозам на будущее, осадки в центральной и, особенно, восточной части Кыргызстана могут стать более интенсивными (Reyer et al., 2015). Изменения в количестве осадков в мультимодельном прогоне гораздо более выражены зимой (декабрь — февраль), чем летом (июнь — август) (Reyer et al., 2015). Анализ данных о количестве осадков по всей стране свидетельствует о том, что количество осадков увеличивается весной, а не зимой, хотя это увеличивается незначительно (Третье национальное сообщение Кыргызской Республики по РКИК ООН, 2016). Помимо изменений в количестве осадков, Кыргызстан, вероятно, будет испытывать повышенную засушливость в более низких районах из-за увеличения испарения в результате повышения температуры.

■ **ТАДЖИКИСТАН.** По прогнозам, к 2050 году среднегодовая температура увеличится на 2 °С, особенно в период с декабря по август (Всемирный банк, Портал знаний об изменении климата). Анализ данных за последние 60 лет показывает, что температура воздуха постоянно повышается со средней скоростью 0,2–0,25 °С в декаду, особенно в западной части Таджикистана, в то время как в восточной части страны повышение температуры воздуха менее выражено. В период 2011–2041 гг. не выявлено существенных различий в тенденциях потепления между разными сценариями выбросов. Однако, начиная с середины столетия (2041–2070 гг.), будет наблюдаться заметное повышение температуры в диапазоне +1,1...+2,8 °С по сценарию RCP8.5, а к концу столетия (2071–2099 гг.) прогнозируется значительное повышение температуры в диапазоне +4,8...+6,6 °С (Aalto et al., 2017). Изменения количества осадков не столь очевидны, поскольку модели дают противоречивые прогнозы. В среднем ожидается уменьшение количества осадков в западной части страны, а в горной восточной части возможно небольшое их увеличение, хотя эти изменения незначительны из-за и без того низких годовых сумм осадков (менее 100 мм в год) (Aalto et al., 2017). Ожидается, что потепление климата повлечёт за собой раннее таяние снега в весенние месяцы, что приведёт к частым наводнениям (Xenarios et al., 2019).

■ **ТУРКМЕНИСТАН.** Анализ тенденций изменения климата в Туркменистане характеризуется пространственной изменчивостью и сложностями в интерпретации данных. Исследования показывают, что пустыни Центральной Азии могут стать менее засушливыми в результате глобального потепления, что потенциально может привести к смещению на юг и усилению западных циклонов, подобно условиям раннего голоцена (Lioubimtseva & Cole, 2006). Климатические модели предсказывают повышение температуры на 1–2 °С к 2030–2050 годам, при этом прогнозные уровни осадков варьируются и демонстрируют значительную неопределённость (Lioubimtseva & Cole, 2006). Моделирование сценария RCP8.5 показывает тенденцию значительного повышения температуры с 2016 по 2055 год на 0,51 °С в декаду, при этом ожидается сокращение снежного покрова и увеличение испарения вдоль Каракумского канала, что приведёт к значительному сокращению

доступных водных ресурсов в Туркменистане (Дуан и соавт., 2019). Климатические данные, полученные в районе Аральского моря с 1960-х годов, свидетельствуют о сдвиге в сторону более континентального климата, характеризующегося повышением летних температур, понижением зимних температур, уменьшением влажности и изменением характера осадков (Middleton, 2002). Сокращение площади поверхности Аральского моря связывают с уменьшением количества осадков и солевой пылью, влияющими на быстрые изменения климата и растительного покрова (Glazovsky, 1995). Хотя предполагается вероятное повышение температуры воздуха в Центральной Азии, индекс засушливости не показывает устойчивых тенденций для всего региона (IPCC, 2001). Данные дистанционного зондирования свидетельствуют об уменьшении засушливости в северной части региона и смещении зоны пустынь на юг (Золотокрылин, 2003), что подтверждается данными Харина и соавторов (Харин и соавт., 1998), которые указывают на возможное уменьшение засушливости в этом регионе в течение последних десятилетий.

■ **УЗБЕКИСТАН.** Прогнозы будущего изменения климата Узбекистана в основном сосредоточены на характеристиках температуры приземного воздуха и осадков. Радченко и соавторы (Радченко и соавт., 2017) спрогнозировали изменения стока в бассейне Сырдарьи, получив повышение температуры воздуха (с 3,7 °С до 3,9 °С) и увеличение количества осадков (с 11 % до 13 %). Во многих исследованиях (Sorg et al., 2012a, 2014, 2015; Kure et al., 2013; Barandun et al., 2020) были оценены негативные последствия глобального потепления для ледников Центральной Азии, включая Узбекистан, причём у Зорг и соавторов (Sorg et al., 2014) спрогнозировано существенное сокращение ледников из-за повышения температуры воздуха над горами Тянь-Шаня, которые имеют жизненно важное значение для водоснабжения региона. Негативные последствия изменения климата для сельского хозяйства и производства продовольствия в Центральной Азии были рассмотрены в работах Зоммера и соавторов (Sommer et al., 2013) и Бободжонова и Ав-Хассана (Bobojonov and Aw-Hassan, 2014). Наконец, в обзоре Ксенариоса и соавторов (Xenarios et al., 2019) обобщаются существующие литературные данные о последствиях антропогенного изменения климата и мерах по адаптации к нему в регионе.

Рисунок 3.1.1. Изменение температуры воздуха в Центральной Азии по трём сценариям выбросов к 2100 г. по данным Зигфрида и соавторов

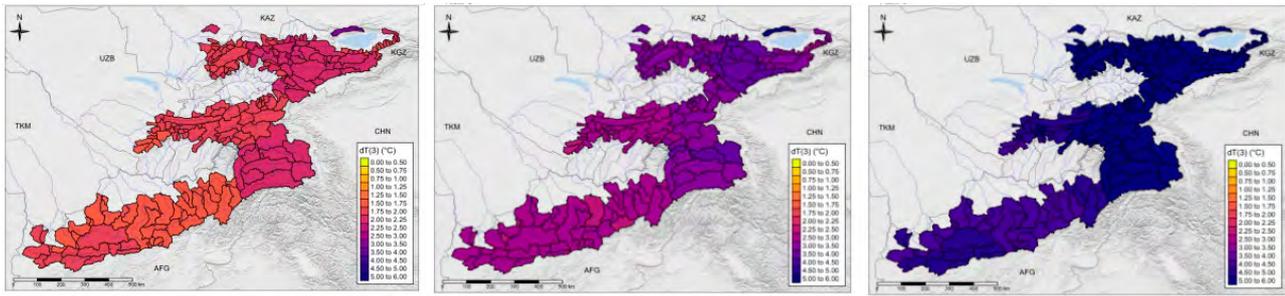
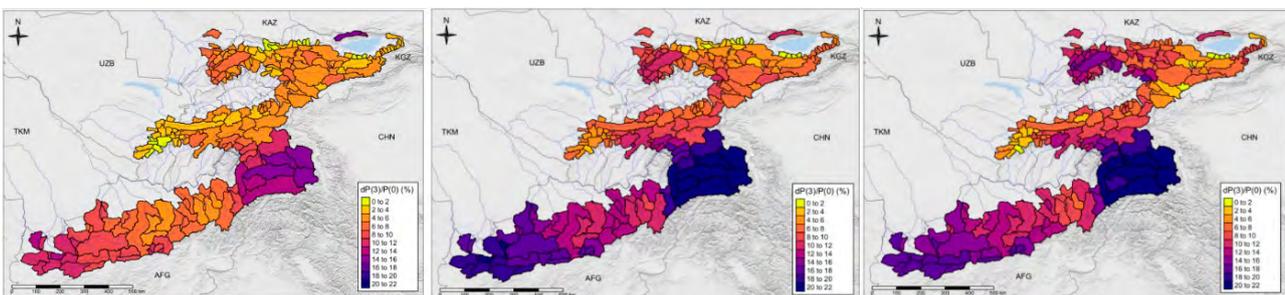


Рисунок 3.1.2. Изменение количества осадков в Центральной Азии по трём сценариям выбросов к 2100 г. по данным Зигфрида и соавторов



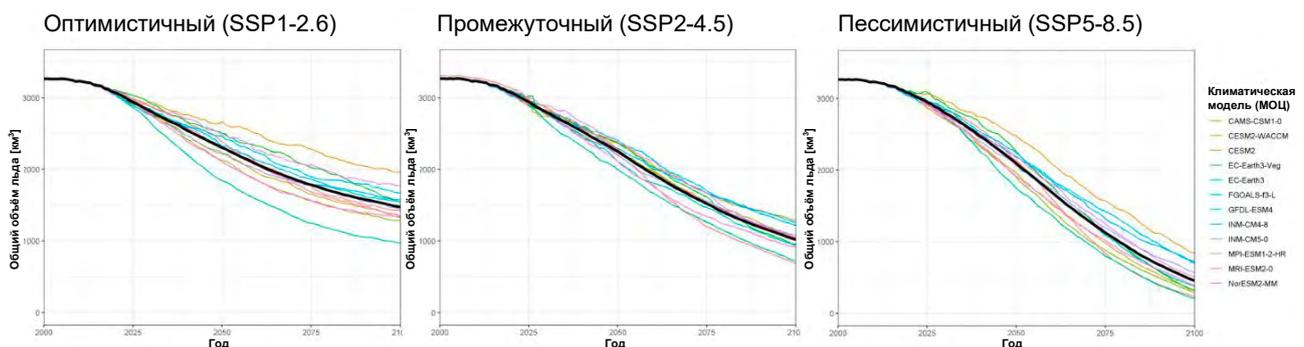
Источник: Siegfried et al., 2024

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЁМА ЛЕДНИКОВ В БУДУЩЕМ

Ожидается, что до конца XXI века ледники Тянь-Шаня и Памира сохранят текущую, ускоряющуюся тенденцию потери массы (Rounce et al., 2023). Наши результаты моделирования показывают, что к 2100 году общая потеря объёма льда составит от 58 % (сценарий с низким уровнем

выбросов) до 85 % (сценарий с высоким уровнем выбросов) от общего объёма ледников по состоянию на 2020 год (рис. 3.2.1). Так, для сценария с высоким уровнем выбросов это означает, что из нынешней массы льда в 860 км³ останется только 140 км³.

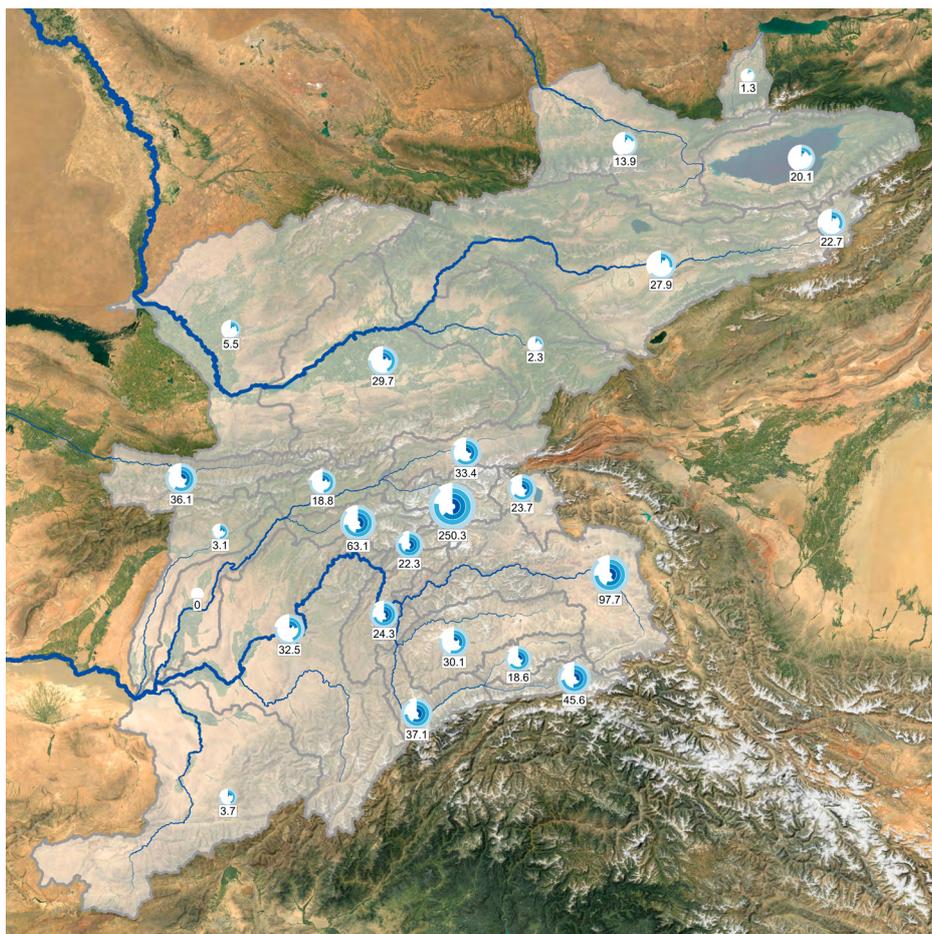
Рисунок 3.2.1. Моделируемое изменение объёма льда в регионе 13 Рэндольфского кадастра ледников за период с 2000 по 2100 год. Чёрная линия показывает среднее значение по всем 13 МОЦ (цветные линии) для трёх различных сценариев. Все сценарии показывают сильную потерю объёма льда.



Потеря объёма ледников будет ускоряться до середины столетия, а затем несколько замедлится (рис. 3.2.2). Для Тянь-Шаня (бассейн Сырдарьи) потеря объёма льда будет наибольшей до 2040 года, после чего она замедлится. Это связано не с уменьшением атмосферного потепления,

а скорее со значительным сокращением объёма льда, в результате чего остаётся меньше льда для таяния. Для большинства бассейнов Памира (бассейн Амударьи) относительная потеря объёма льда более стабильна и незначительно уменьшается до конца столетия (рис. 3.2.2).

Рисунок 3.2.2. Потери объёма льда в масштабах всего водосбора для промежуточного сценария (SSP2-4.5). Синий цвет на круговых диаграммах указывает на изменение объёма к 2040, 2060, 2080 и 2100 годам (от самого светлого к самому тёмному соответственно) по отношению к объёму льда в 2020 году (число под круговой диаграммой, в км³).



Потери массы ледников в Центральной Азии неоднородны в пространственном отношении (рис. 3.1.2 и табл. 3.1.1). Прогнозируется, что самые маленькие и низко расположенные ледники исчезнут задолго до 2100 года, даже в сценариях с низким уровнем выбросов, в то время как самые большие и высоко расположенные ледники сохранятся до XXII века, даже при более пессимистичных прогнозах, хотя и с потерей объёма более чем на 50 %. Таким образом, западные окраины Тянь-Шаня и Памира к концу столетия в большей степени пострадают от потери объёма льда, чем, например, межгорные области Тянь-Шаня и Памира. Внешние орографические окраины Тянь-Шаня и Памира — это районы,

которые в настоящее время получают большую долю осадков из-за эффекта экранирования западного струйного течения рельефом. Однако ледники в этом районе расположены на меньшей высоте и, соответственно, при более высоких среднегодовых температурах воздуха. Таким образом, тенденции повышения температуры воздуха будут оказывать более сильное влияние на скорость отступления ледников в этом районе.

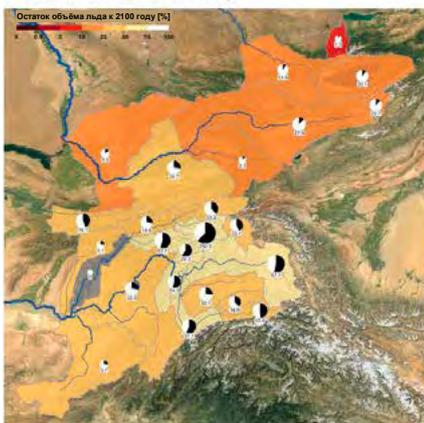
Резкий контраст в прогнозируемой потере объёма льда наблюдается между водосборами в центральноазиатской части Тянь-Шаня и на Памире (рис. 3.2.3). Это очевидно при всех сценариях. В бассейне Амударьи и на

Каракульском водосборе ледники сохранятся до конца века, особенно на центральном Памире, где ледник Федченко содержит большую часть объёма льда. Для центральноазиатской части Тянь-Шаня прогнозируется отступление льда на 70 % при наиболее благоприятных сценариях,

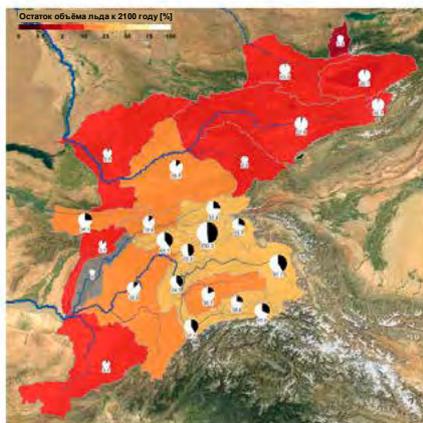
а при сценарии высоких выбросов ледники в этом районе исчезнут полностью (рис. 3.2.2 и S5 для других сценариев). В этом сценарии оледенение сильно сократится по всему региону и сохранится только на очень больших высотах.

Рисунок 3.2.3. Потеря объёма ледников в масштабах всего водосбора. На круговых диаграммах черным цветом показан общий объём льда, который останется к 2100 году, а белым — общий объём льда, который будет утрачен. Число под круговой диаграммой указывает объём льда на 2020 год в км³.

Оптимистичный (SSP1-2.6)



Промежуточный (SSP2-4.5)



Пессимистичный (SSP5-8.5)

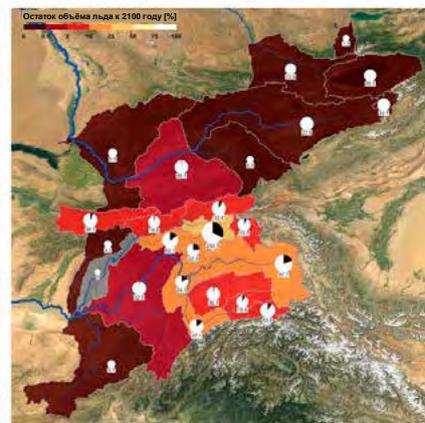


Таблица 3.2.1. Относительное изменение объёма льда по отношению к объёму льда на 2020 год для всех трёх сценариев выбросов.

Оптимистичный (SSP1-2.6)

год	2020		%		
	Водосбор	км ³	2040	2060	2080
Амударья	681	87	73	60	52
Кафирниган	3	70	53	36	26
Пяндж	308	86	70	52	45
Ванчоб	22	87	77	66	60
Бартанг	98	89	75	60	53
Гунт	30	78	54	35	27
Вахан	46	88	70	60	49
Памир	19	83	62	49	38
Вахш	366	88	76	64	57
Хингов	63	89	73	61	55
Муксу	250	90	80	70	62
Кызылсу	33	82	63	47	37
Сырдарья	88	66	42	24	19
Карадарья	2	54	30	18	13
Нарын	51	63	38	20	12
Карасай	23	68	42	23	12
Зеравшан	36	82	63	52	44
Чу	14	49	23	13	10
Каскелен	1	44	14	8	6
Каракуль	24	84	68	50	43
Иссык-Куль	20	50	25	13	11

Промежуточный (SSP2-4.5)

год	2020		%		
	Водосбор	км ³	2040	2060	2080
Амударья	681	87	69	51	36
Кафирниган	3	78	51	23	10
Пяндж	308	86	69	50	35
Ванчоб	22	92	77	60	47
Бартанг	98	89	74	55	41
Гунт	30	79	55	34	18
Вахан	46	88	73	52	33
Памир	19	85	65	42	27
Вахш	366	88	72	56	41
Хингов	63	87	72	54	40
Муксу	250	90	78	63	48
Кызылсу	33	84	63	40	26
Сырдарья	88	70	37	17	7
Карадарья	2	57	25	8	3
Нарын	51	65	31	11	3
Карасай	23	69	35	12	3
Зеравшан	36	83	60	40	25
Чу	14	53	19	6	2
Каскелен	1	42	10	4	1
Каракуль	24	84	64	43	27
Иссык-Куль	20	53	20	7	3

Пессимистичный (SSP5-8.5)

год	2020		%		
	Водосбор	км ³	2040	2060	2080
Амударья	681	85	60	37	21
Кафирниган	3	71	27	6	0
Пяндж	308	83	54	31	14
Ванчоб	22	89	67	44	24
Бартанг	98	86	61	39	20
Гунт	30	74	40	14	2
Вахан	46	84	57	32	9
Памир	19	80	51	28	8
Вахш	366	87	66	43	26
Хингов	63	83	61	36	16
Муксу	250	89	71	50	33
Кызылсу	33	80	49	22	8
Сырдарья	88	62	27	5	1
Карадарья	2	48	16	2	0
Нарын	51	56	23	3	0
Карасай	23	60	26	3	0
Зеравшан	36	81	50	24	6
Чу	14	44	12	1	0
Каскелен	1	35	5	1	0
Каракуль	24	81	52	25	7
Иссык-Куль	20	44	12	2	0

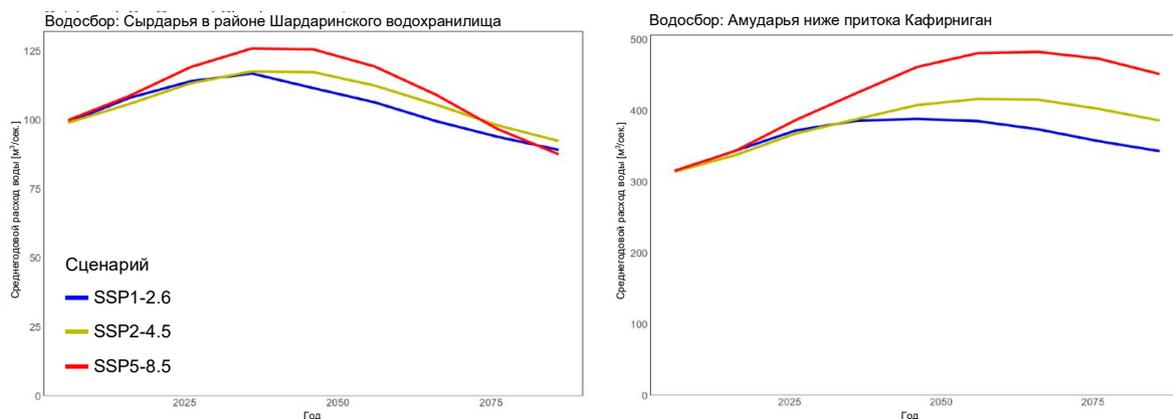
4. ИЗМЕНЕНИЯ ВКЛАДА ТАЛЫХ ВОД ЛЕДНИКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В БУДУЩЕМ

4.1. ГОДОВОЙ ВКЛАД ТАЛЫХ ВОД

Ожидается, что прогнозируемые изменения в состоянии ледников существенно повлияют на гидрологический режим горных водосборов. По мере того как ледники будут терять объём льда, высвобождение талой воды будет увеличиваться, поначалу ускоренными темпами, пока не будет достигнут «пик водности» (Huss & Hock, 2018). После этого вклад таяния ледников начнёт снижаться из-за уменьшения их размеров, а доминирующими источниками стока станут таяние снега и, в некоторых случаях, дождевые осадки (Kaser et al., 2010). Этот сдвиг приведёт к изменению как аккумулирующей способности, так и характера стока в затронутых районах, что будет иметь важные последствия для задач управления водными ресурсами. Сроки наступления пикового вклада талых вод ледников зависят от темпов потепления (Rounce et al., 2023), но также в значительной степени от текущего объёма льда, как в абсолютном выражении, так и по отношению к размеру водосбора. Ожидается, что крупнейшие ледниковые комплексы на Памире не достигнут пикового стока до 2100 года, в то время как меньшие, характеризующиеся меньшей степенью оледенения водосборные бассейны, возможно, уже прошли свой максимум стока. Как показано на рис. 4.1.1 и рис. S1, ни

один из смоделированных водосборов ещё не достиг пика ледникового стока. Однако несколько водосборов в бассейне Сырдарьи скоро достигнут своего пикового стока талых вод. Например, Каскелен, Чу и Иссык-Куль скоро достигнут пика стока талых вод, а у рек Карадарья, Нарын и Карасу, как ожидается, это произойдёт в течение следующего десятилетия. По прогнозам, другие водосборы бассейна Сырдарьи достигнут пика стока к середине столетия. После этого поступление талых ледниковых вод в крупные реки бассейна Сырдарьи начнёт сокращаться (рис. 4.1.1). В сравнении с этим ожидается, что бассейн Амударьи и связанные с ним водосборные бассейны достигнут пика стока позже. Некоторые из них, такие как Ванчоб и Муксу, могут достичь максимума поступления талых вод только к концу XXI века, при этом вклад талых вод, возможно, продолжит увеличиваться и в XXII веке. Кроме того, если в суббассейнах Сырдарьи ожидается более резкое снижение годового вклада талых вод после пика стока, то в бассейне Амударьи снижение может быть более постепенным. В результате изменения речного стока, вероятно, будут более выраженными на Сырдарье, а в бассейне Амударьи ожидаются более постепенные сдвиги.

Рисунок 4.1.1. Годовой вклад талых вод ледников в общий речной сток Сырдарьи и Амударьи.



Резкий контраст в изменении объёма льда между бассейнами Тянь-Шаня и Памира отражается в вкладе талых вод ледников в их суббассейнах (рис. 4.1.1 и табл. 4.1.2). Прогнозируемый среднегодовой сток включает только вклад ледников в общий сток водосбора (см. раздел 2.2). Ожидается, что к концу столетия Сырдарья, а также Иссык-Куль, Каскелени Чубудут испытывать значительное сокращение годового притока талых ледниковых вод. Например, наиболее сильно затронутые изменениями водосборные бассейны Чу, Каскелен и Иссык-Куль могут столкнуться с сокращением притока талых вод до 25 %. Это снижение обусловлено не атмосферным потеплением, а тем, что объём льда в этих водосборных бассейнах будет истощён настолько, что текущий уровень продуцирования талых вод будет невозможен. Напротив, в бассейне Амударьи, а также в Каракульском и Зеравшанском водосборах прогнозируется увеличение вклада талых вод.

При сценарии с низким уровнем выбросов это увеличение может составить до 16 %, а при сценарии с высоким уровнем выбросов в бассейнах с высоким уровнем оледенения, таких как водосборный бассейн Муксу, поступление талой воды может увеличиться на 80 %. Водосборный бассейн Муксу, на котором расположен ледник Федченко, особенно важен для будущей водообеспеченности, так как изменения режима талых вод в масштабах всего бассейна в значительной степени определяются поведением этого ледника. В суббассейнах Амударьи вклад талых вод может вырасти на 35–70 %, что приведёт к увеличению годового расхода талых вод ледника в 1,8 раза по сравнению с 1991–2020 годами. Такое значительное увеличение притока талых вод может иметь серьёзные последствия для водообеспеченности, потенциально грозя наводнениями и затоплениями, а также влияя на производство гидроэлектроэнергии.

Рисунок 4.1.2. Относительное изменение (от настоящего времени до 2100 года) вклада талых вод ледников в общегодовой речной сток в разбивке по водосборным бассейнам для трёх сценариев выбросов.

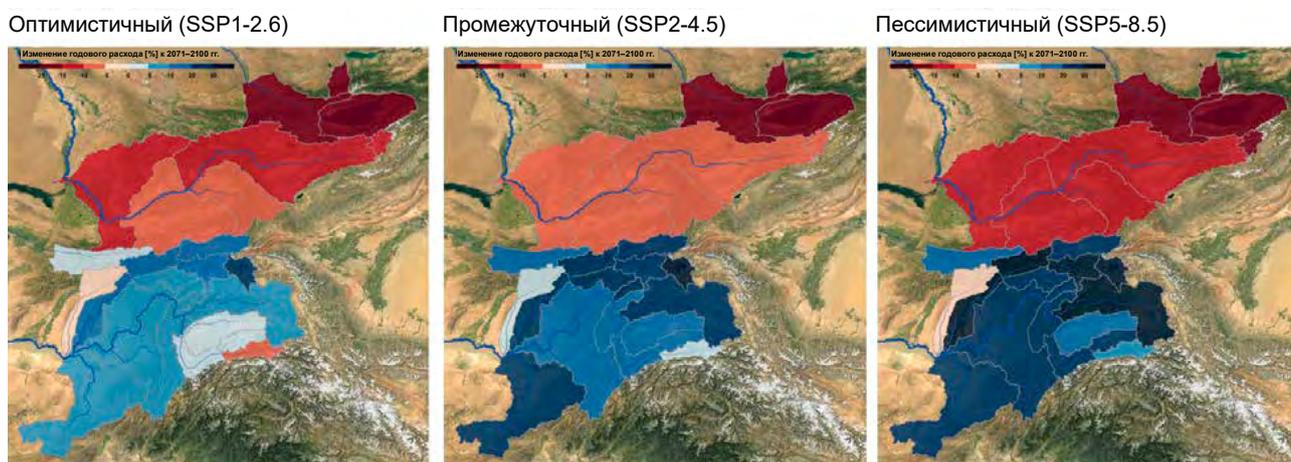


Таблица 4.1.1. Изменения годового вклада талых вод ледников в общий речной сток для каждого моделируемого водосбора для различных будущих периодов времени.

Оптимистичный (SSP1-2.6)

Водосбор	Расход в 1991–2020 гг.	Изменение расхода		
		в 2001–2030 гг.	в 2031–2060 гг.	в 2071–2100 гг.
м³/сек				
Амударья	315	29	74	29
Бартанг	41	4	11	4
Чу	26	1	-1	-5
Гунт	19	2	5	0
Иссык-Куль	30	2	0	-7
Карадарья	4	0	0	0
Каракуль	8	1	4	2
Карасу	14	1	4	-2
Каскелен	3	0	0	-1
Хингов	47	4	10	4
Кафирниган	7	0	1	0
Кызылсу	20	2	6	2
Муксу	79	8	24	13
Нарын	45	5	8	-5
Памир	8	1	2	0
Пяндж	134	13	30	8
Сырдарья	99	9	12	-10
Вахш	173	16	44	20
Ванчоб	17	1	3	15
Вахан	5	0	1	1
Зеравшан	37	3	5	0

Промежуточный (SSP2-4.5)

Водосбор	Расход в 1991–2020 гг.	Изменение расхода		
		в 2001–2030 гг.	в 2031–2060 гг.	в 2071–2100 гг.
м³/сек				
Амударья	314	23	94	72
Бартанг	41	3	15	11
Чу	26	1	0	-5
Гунт	18	2	6	2
Иссык-Куль	30	2	1	-6
Карадарья	4	0	0	0
Каракуль	8	1	5	4
Карасу	14	1	5	-1
Каскелен	3	0	0	-1
Хингов	47	3	13	11
Кафирниган	7	0	1	0
Кызылсу	20	2	8	5
Муксу	79	6	27	28
Нарын	45	10	4	-4
Памир	8	1	3	1
Пяндж	134	10	41	26
Сырдарья	99	7	18	-7
Вахш	173	13	52	46
Ванчоб	17	1	4	4
Вахан	5	0	1	0
Зеравшан	37	2	7	4

Пессимистичный (SSP5-8.5)

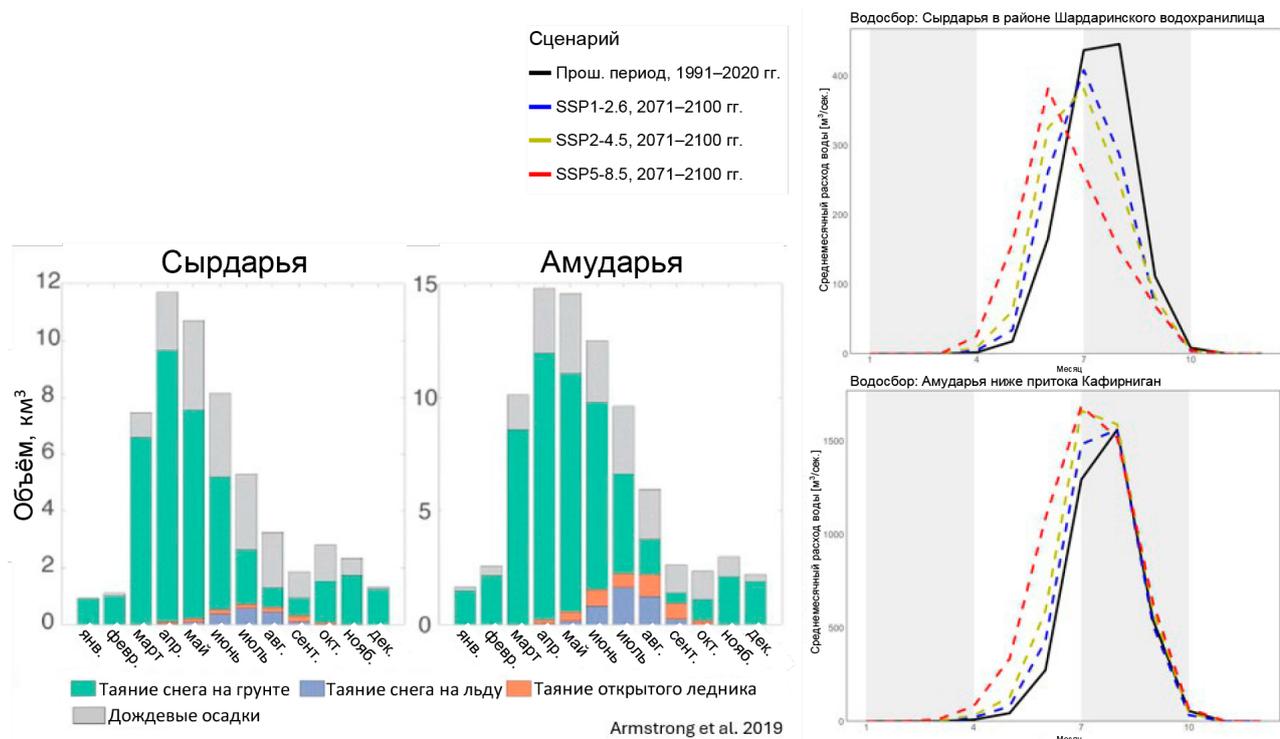
Водосбор	Расход в 1991–2020 гг.	Изменение расхода		
		в 2001–2030 гг.	в 2031–2060 гг.	в 2071–2100 гг.
м³/сек				
Амударья	316	28	146	136
Бартанг	41	4	23	22
Чу	26	1	1	-6
Гунт	18	2	9	4
Иссык-Куль	30	2	2	-6
Карадарья	4	0	1	0
Каракуль	8	1	8	5
Карасу	14	1	7	-3
Каскелен	3	0	0	-1
Хингов	47	3	18	18
Кафирниган	7	0	1	0
Кызылсу	21	2	11	6
Муксу	79	45	64	64
Нарын	45	4	14	-7
Памир	8	14	3	3
Пяндж	134	13	61	48
Сырдарья	100	9	26	-12
Вахш	174	14	82	89
Ванчоб	17	1	8	7
Вахан	5	0	2	0
Зеравшан	37	3	11	5

4.2. СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВКЛАДА ТАЛЫХ ВОД

Вклад талых ледниковых вод играет важную роль в регулировании динамики речного стока, влияя как на сроки, так и на объёмы расходов рек (рис. 4.2.1). В сезон таяния этот вклад может увеличиваться до 70–90 % для бассейна Амударья и до 20–40 % для бассейна Сырдарья от среднегодового поступления воды (Saks et al., 2022; Armstrong et al., 2019, Huss

and Hock, 2018). Таяние ледников обеспечивает надёжное водоснабжение сельского хозяйства, промышленности и экосистем, особенно после истощения сезонного снежного покрова. Поэтому понимание сезонного распределения поступления воды в результате таяния ледников, не менее важно, чем изучение вклада годового стока.

Рисунок 4.2.1. Распределение месячного стока для различных компонентов водных ресурсов, по материалам Армстронга и соавторов для Сырдарьи и Амударьи (слева). Сезонные изменения вклада талых вод ледников для водосборов Сырдарьи и Амударьи на 2100 год (справа).



Источник: Armstrong et al., 2019

В Центральной Азии сезон таяния обычно начинается в середине — конце апреля и длится до начала октября (рис. 4.2.1 и рис. S2), при этом в начале сезона основной вклад в сток вносит таяние снега на ледниках, а таяние льда начинается только тогда, когда на леднике начинает подниматься снеговая линия, обычно в конце июня — начале июля. Сезон таяния немного короче в самых высоких водосборах Памирских гор, где таяние обычно начинается в мае (рис. S2). Для большинства бассейнов пик высвобождения талых вод ледников приходится на август, за исключением бассейнов Сырдарьи, Карадарьи, Каскелена, Зеравшана и Чу, где приток талых вод в июле и августе одинаков, и бассейна Кафирниган, где выраженный пик приходится на июль (рис. S2). Время этого пика притока талой воды будет сильно зависеть от будущих изменений в протяженности льда, поскольку эти изменения не будут происходить равномерно в течение года.

В бассейне Амударьи вклад талых вод будет увеличиваться весной и в начале лета, а в бассейне Сырдарьи прогнозируется снижение вклада талых вод в конце лета, сопровождающееся общим снижением сезонного пикового расхода (рис. 4.2.1). По прогнозам, в обоих бассейнах сезон таяния начнется раньше — уже в конце марта по всем

сценариям выбросов. Это приведет к быстрому увеличению скорости таяния, в результате чего весной в две основные реки Центральной Азии будет поступать большой избыток воды.

Хотя потепление атмосферного воздуха приведет к более раннему началу сезона таяния в большинстве бассейнов, бассейны Гунт, Пяндж, Вахан и Памир (описание бассейнов приведено в таблице 2.1.1) являются исключениями (рис. 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4 и S2). Более раннее начало весенней абляции сопровождается большим увеличением сброса талых вод, в результате чего реки получают больший объем талых вод за более короткий период времени (рис. S2). Такое ускоренное весеннее и раннее летнее таяние приведет к смещению пикового вклада талых вод ледников с августа на более равномерно распределенный июльско-августовский пик или даже июльский максимум, особенно при сценариях с высоким и средним уровнем выбросов. Ожидается, что только в нескольких бассейнах, таких как Вахш, Муксу и Каракуль, пик вклада талой воды будет приходиться на август (рис. 4.2.3). Напротив, в таких бассейнах, как Кафирниган, Чу и Каскелен, пик вклада талых вод сместится уже на июнь (рис. 4.2.2).

Рисунок 4.2.2. Сезонные изменения вклада талых вод ледников на водосборе Вахш, Муксу и Каракуль на 2100 год.

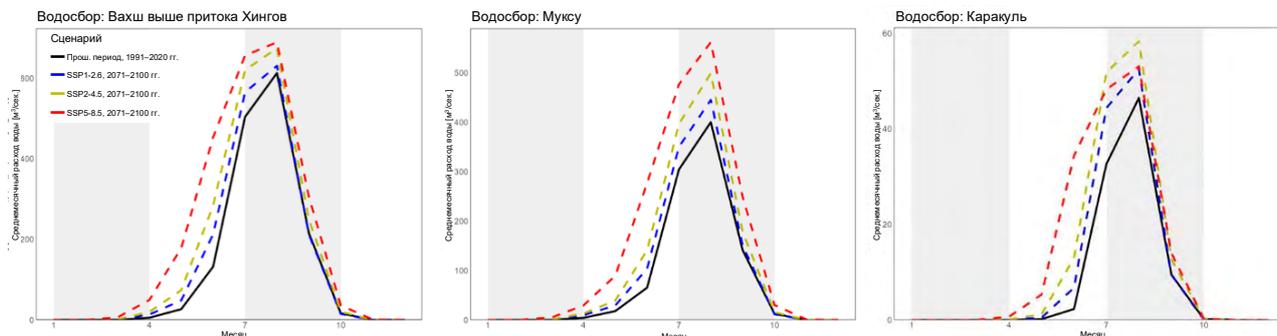
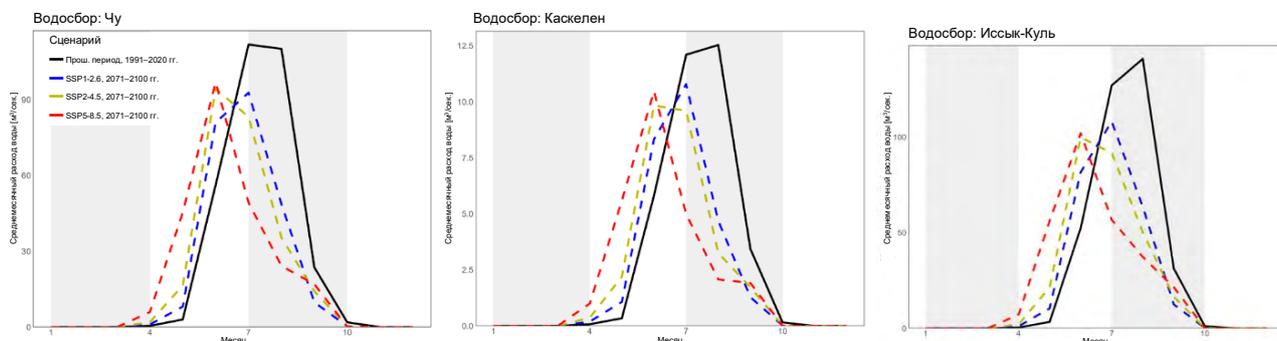


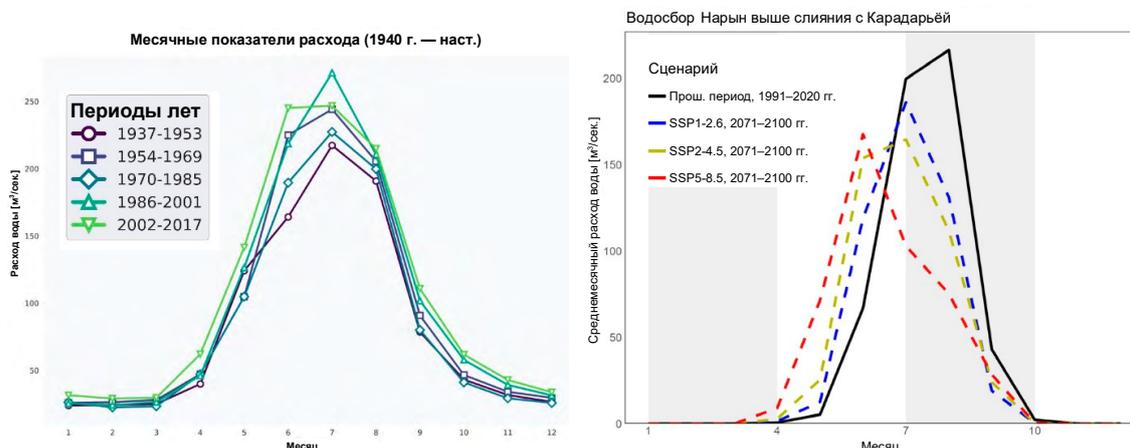
Рисунок 4.2.3. Сезонные изменения вклада талых вод ледников на водосборе Чу, Каскелен и Иссык-Куль на 2100 год.



Многолетние наблюдения за стоком свидетельствуют о происходящих изменениях на водосборе Нарына. Сток в летние месяцы увеличился с 1940 по 2000 год в связи с ускоренным таянием в условиях потепления климата (рис. 4.2.4). Хотя пик стока в этот период приходился на июль, сдвиг за последние 20 лет в сторону более раннего максимума стока указывает на то, что пик водности для этого водосбора будет достигнут

очень скоро и летний сток будет уменьшаться в течение следующих нескольких десятилетий (рис. S1). К концу столетия пик вклада талых вод будет приходиться на период до наступления жаркого и сухого летнего периода, и значительная часть летнего вклада талых вод будет утрачена. При экстремальном сценарии выбросов этот показатель может составить менее 50 % от текущего стока (рис. 4.2.4).

Рисунок 4.2.4. Исторические изменения сезонного стока (слева) и прогнозируемые изменения к 2100 году для водосбора Нарын по трём сценариям выбросов (справа).

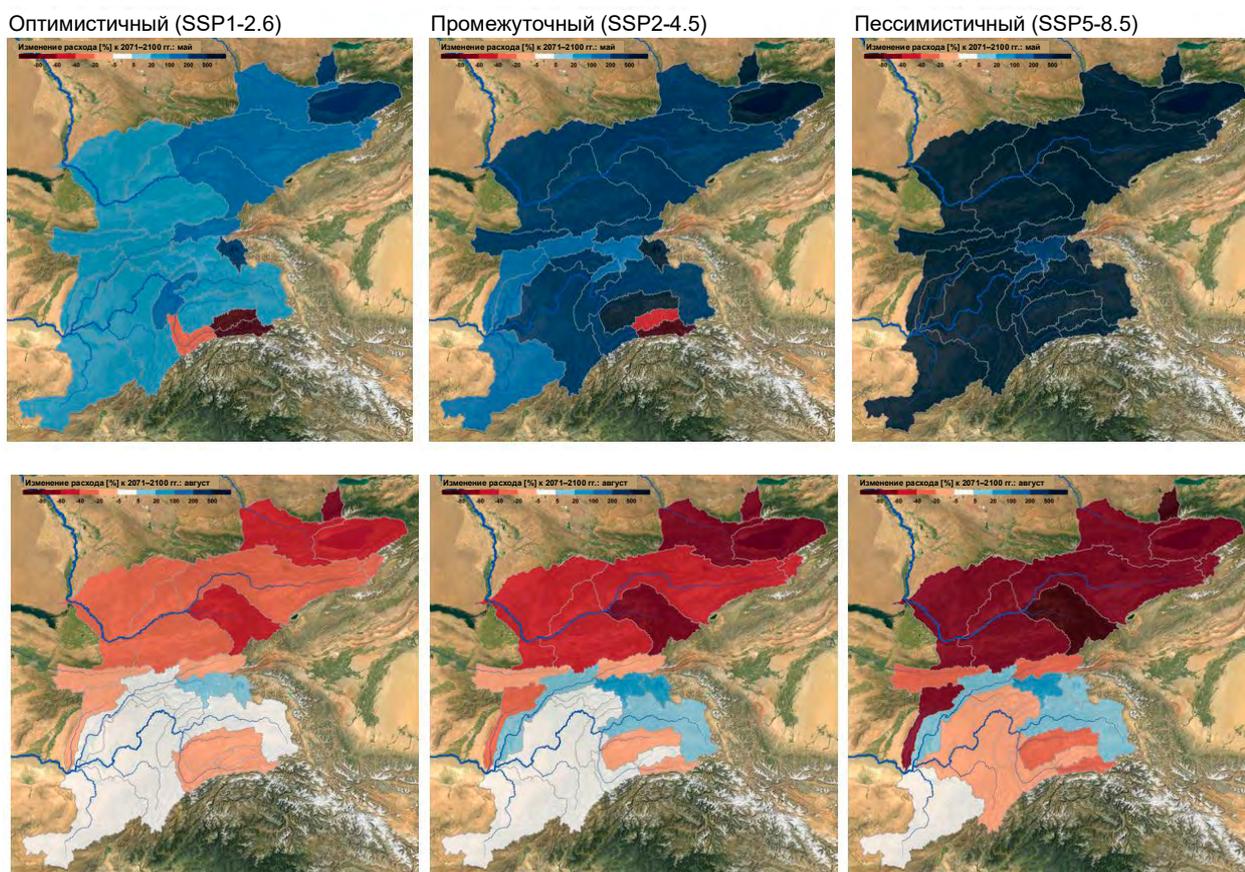


Источник: Saks et al., 2022

В то время как в большинстве памирских водосборов (таких как Амударья, Пяндж, Ванчоб, Бартанг, Гунт, Хингов, Вахш, Муксу и Каракуль) вклад талых вод в первые летние месяцы будет расти, в водосборах Тянь-Шаня произойдёт значительное сокращение величины пиков летнего вклада талых вод. Эти сокращения окажут значительное влияние на общий речной сток, поскольку ледники Тянь-Шаня обеспечивают около 42 % поступления пресной воды в Сырдарью (Huss and Hock, 2018). Наиболее сильное сокращение стока летом прогнозируется для бассейнов Чу, Каскелен, Иссык-Куль,

Нарын и Карасу, где расположены одни из самых густонаселённых районов региона (рис. 4.2.3). На Памире к 2100 году ожидается снижение вклада летних талых вод в бассейнах Кафирниган, Гунт, Кызылсу и Вахан, причём два последних являются единственными бассейнами Памира, в которых прогнозируется снижение вклада талых вод по сравнению с текущим уровнем к концу столетия. В Вахше и Муксу, напротив, прогнозируется увеличение вклада талых вод во все месяцы по всем сценариям, а в Каракуле прогнозируется значительное увеличение с июня по август (рис. 4.2.4).

Рисунок 4.2.5. Изменение расхода талой воды ледников для каждого водосбора к концу столетия по трём сценариям выбросов для мая (вверху) и августа (внизу).



Наиболее значительные изменения вклада талых вод ожидаются в мае и августе (рис. 4.2.5, S3, S4). В мае почти на всех водосборах наблюдается увеличение вклада талых вод по всем сценариям, что свидетельствует о затянувшемся сезоне таяния. Этот сдвиг обусловлен более высокими температурами воздуха на больших высотах, что приводит к более раннему таянию снега, льда и фирна, при этом высвобождение талой воды может в два-три раза превышать текущие уровни. Снеготаяние и таяние ледников будут

усиливаться ранней весной и, следовательно, будут быстрее наполнять реки, что приведёт к сокращению сезонной и многолетней ёмкости водохранилищ. В более крупных бассейнах, таких как Сырдарья и Амударья (рис. 4.2.1), вклад ранневесеннего таяния ледников относительно невелик по сравнению со снеготаянием, которое остаётся наиболее важным источником воды на весну. В этих бассейнах значение дождевых осадков будет возрастать и частично компенсировать изменение притока от талых

снеговых и ледниковых вод в годовом масштабе в условиях более тёплого климата. Однако совокупный эффект от увеличения объёмов и более раннего таяния ледников и увеличения количества осадков может перегрузить речные системы и повысить вероятность весенних паводков и селей.

Напротив, прогнозируется резкое сокращение притока талых вод в августе для водосборных бассейнов Тянь-Шаня, причём при промежуточных сценариях сокращение составит 60–80 %, а при сценариях высоких выбросов — почти полная потеря стока талых

вод для многих водосборных бассейнов Тянь-Шаня, в результате чего в конце лета в регионе будет засушливо (рис. 4.2.5) Хотя водосборные бассейны на Памире могут не испытать существенного сокращения пикового стока, сдвиг в сторону более раннего поступления талых вод приведёт к тому, что в таких речных бассейнах, как Зеравшан, Кызылсу, Гунт, Пяндж, Вахан, Памир и Кафирниган, в августе станет суше при оптимистичном сценарии, а аналогичное сокращение водности в других бассейнах, таких как Пяндж, Ванчоб и Хингов, произойдёт при сценариях более высоких выбросов (рис. 4.2.5).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. ИЗМЕНЕНИЯ ВКЛАДА В СТОК

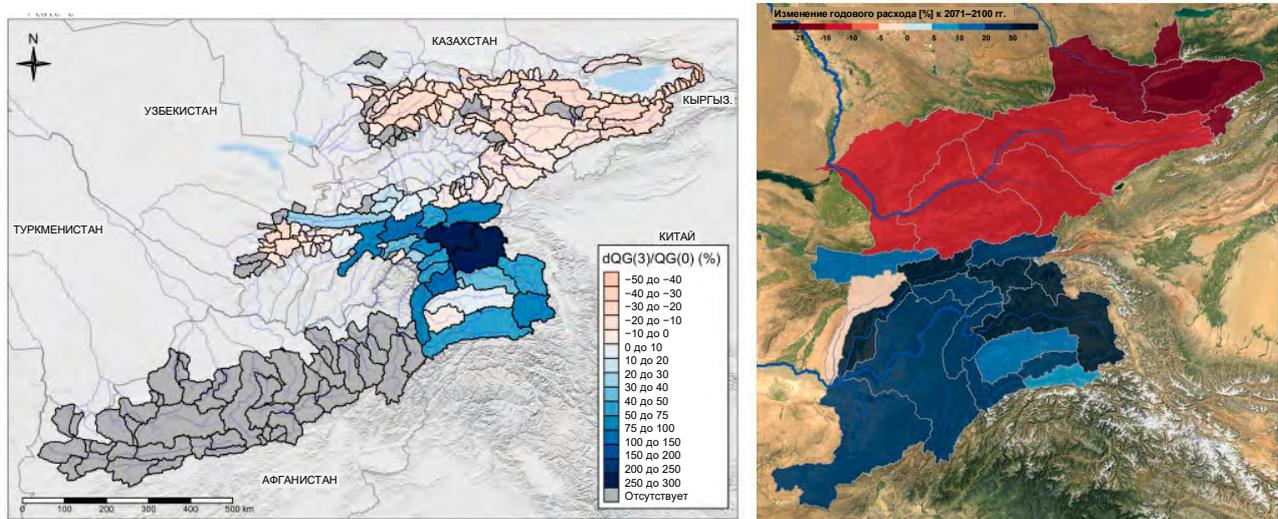
Прогнозы гидрологической модели в работе Зигфрида и соавторов (Siegfried et al., 2024) для Центральной Азии указывают на увеличение фактического испарения от 7 % до 17 % и изменение стока от +1 % до -3 % для сценариев SSP1-2.6 и SSP5-8.5 соответственно. При наиболее экстремальном климатическом сценарии (SSP5-8.5) ожидается увеличение стока на 3,8 % и 5,0 % в первый и второй будущие периоды, а затем снижение на -2,7 % в третий период. Прогнозируемое увеличение и уменьшение стока водосборных бассейнов во времени согласуется с прогнозируемым увеличением вклада талых вод ледников. Зигфрид и соавторы (Siegfried et al., 2024) подчёркивают разнообразие гидрологических реакций на изменение климата в высокогорьях Центральной Азии. Различные гидрологические механизмы в суббассейнах и на разных высотных поясах приводят к географически различным климатическим последствиям в XXI веке. Авторы подчёркивают важность вклада талых вод ледников, что согласуется с нашими результатами (рис. 5.1.1).

Зигфрид и соавторы (Siegfried et al., 2024) делают вывод, что по мере ускорения абляции ледников и потери ледникового льда в течение XXI века на Тянь-Шане будет происходить высыхание зоны формирования стока (рис. 5.1.1 и рис. 5.1.2). Для рек, берущих начало в горах Памира, в течение XXI века будет наблюдаться увеличение стока, частично из-за усиления таяния ледников и того факта, что пик стока там наступает позже, а также, возможно, в некоторой

степени из-за прогнозируемого увеличения количества осадков (рис. 3.1.2).

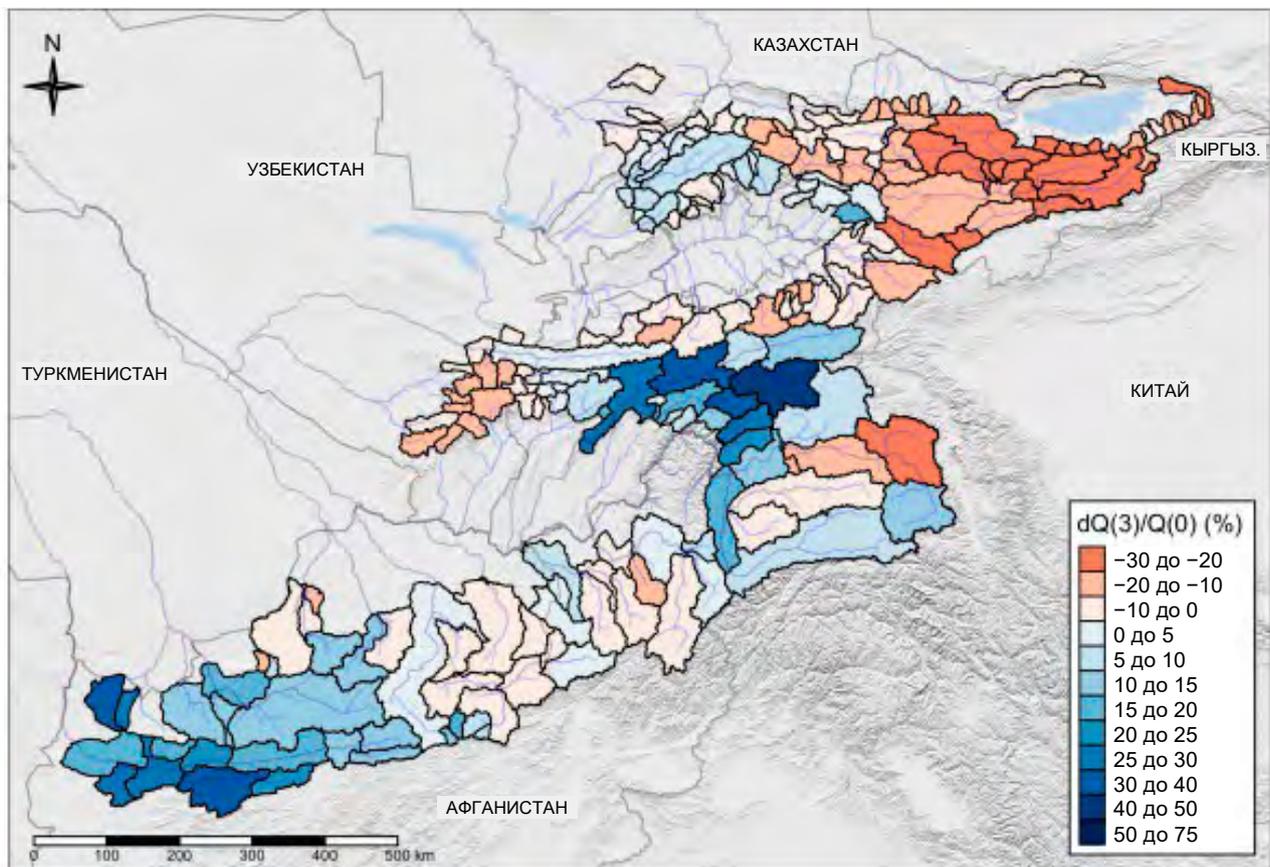
Во всех районах значительного оледенения повышенная абляция ледников стабилизирует общий речной сток до наступления пика таяния ледников (Siegfried et al., 2024). Авторы также подчёркивают важность времени наступления пика водности для стабилизации речного стока и не ожидают значительного изменения водности в бассейне Сырдарьи, несмотря на значительное сокращение вклада талых ледниковых вод в бассейн. Это контрастирует с бассейнами Чу и Иссык-Куля, где общий речной сток уменьшится. В регионе также ожидается увеличение изменчивости стока. Увеличение частоты высоких расходов также вызывает опасения по поводу риска наводнений, что требует разработки более надёжных стратегий по снижению последствий наводнений. Аналогичным образом, Барандун и соавторы (Barandun et al., 2021) обнаружили повышенную изменчивость годового баланса массы ледников, что указывает на риск экстремально высоких или низких вкладов талых вод ледников. Это может создать проблемы для управления водными ресурсами, поскольку инфраструктура и сельскохозяйственная деятельность могут нуждаться в помощи для адаптации к более нестабильной водообеспеченности и экстремальным объёмам воды. Одним из самых больших рисков являются высокие весенние температуры, которые могут привести к усиленному таянию снега и ледников в сочетании с большим количеством осадков, и которые могут стать более частыми в будущем.

Рисунок 5.1.1. Годовой вклад талых вод ледников в общий речной сток, представленный в работе Зигфрида и соавторов и в нашем исследовании к 2100 году для сценариев с наиболее высоким уровнем выбросов (SSP5-8.5).



Источник: Siegfried et al., 2024

Рисунок 5.1.2. Прогнозируемое изменение общего речного стока, представленное в работе Зигфрида и соавторов до 2100 года для сценария с наиболее высоким уровнем выбросов (SSP5-8.5). Показатели стока основаны на моделировании всего водного баланса и включают вклад дождевых осадков, снега, грунтовых вод и таяния ледников, а также испарение.



Источник: Siegfried et al., 2024

5.2. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

В Центральной Азии забор воды тесно связан с её наличием (Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата). Туркменистан и Узбекистан являются наиболее остро испытывающими нехватку воды странами региона (Karthe et al., 2017; Russell, 2018; FAO-AQUASTAT, 2021), при этом 88 % поверхностных вод Туркменистана поступает из Амударьи, протекающей по его границе из Таджикистана и через Афганистан (Определяемый на национальном уровне вклад Туркменистана в рамках Парижского соглашения, 2022; Дуан и соавт., 2019). Кумулятивные последствия изменения климата будут глубокими и усугубят нагрузку на управление водными ресурсами. Климат Центральной Азии резко континентальный. На юге и востоке горные хребты Гималаев, Памира, Гиндукуша и Тянь-Шаня почти полностью изолируют Центральную Азию от влажных воздушных масс с Индийского океана. Из-за этого барьерного эффекта на значительной части Тянь-Шаня и Памира преобладают сухие и холодные условия. На Тянь-Шане в период 1960–2007 гг. было зафиксировано устойчивое повышение температуры воздуха примерно на 0,1–0,2 °C за десятилетие, причём потепление было более выраженным в зимние месяцы. На Памире за тот же период температура повышалась на 0,07–0,11 °C в год (Barandun et al., 2020).

Ожидается, что потепление в Центральной Азии превысит среднемировые показатели, и к 2100 году температура повысится в среднем на 5–6 °C (Sara J. & Proskuryakova T., 2022). Лды и таяние снега являются основными водными ресурсами для густонаселённых низменностей Центральной Азии (Kononov & Shchetinnicov, 1994; Schaner et al., 2012; Chen et al., 2016) и играют важнейшую роль в жизни населения горных районов (Nüsser, 2017; Nüsser et al., 2019; Sitara et al., 2015). Снегозапасы служат резервуаром воды, особенно в зимние месяцы, и определяют сток ручьёв весной и в начале лета. Вклад талых вод ледников, напротив, более значителен в летний период. В настоящее время ежегодный вклад ледниковых талых вод с гор Тянь-Шаня в верхнее течение Сырдарьи составляет 2 % в год. Вклад талых ледниковых вод в Амударью составляет около 8 % в год (Armstrong et al., 2019, Huss and Hock, 2018). При различных сценариях выбросов вклад талых вод

ледников будет уменьшаться для Сырдарьи и увеличиваться для Амударьи до конца столетия. Однако более важным является изменение сезонного распределения стока. Большая часть талой воды станет доступной ранней весной, при этом для Сырдарьи общий объём притока талой воды уменьшится, а для Амударьи — увеличится.

Следовательно, согласно климатическим прогнозам, возрастёт количество как экстремальных наводнений, так и экстремальных засух. Это влечёт за собой изменения в сезонности снежного покрова, приводящие к более раннему таянию, что, в свою очередь, может привести к увеличению весеннего и летнего стока в малоснежные годы или засухам (Siegfried et al., 2012, 2024). Увеличение стока может спровоцировать наводнения, связанные с прорывом ледниковых озёр, селевые потоки и оползни, которые могут нанести ущерб близлежащим населённым пунктам.

Центральная Азия сталкивается со значительными проблемами в области водоснабжения, связанными с общими водными объектами, неравномерным распределением водных ресурсов и растущей конкуренцией между водопользователями (Munia et al., 2016; Krasznai et al., 2019). Быстрый рост численности и плотности населения привёл к увеличению потребности в воде, что усугубляет эти проблемы (Mankin et al., 2015). Система управления водными ресурсами раздроблена между многочисленными министерствами и ведомствами, и, несмотря на продолжающиеся правовые реформы, их реализации препятствуют пробелы в национальных стратегиях, неразвитость систем мониторинга, недостаточный потенциал и слабая координация (Cassara et al., 2019). Нерациональное использование удобрений и пестицидов ухудшило качество вод, что привело к засолению и химическому загрязнению почвы (Cassara et al., 2019; Bekturganov et al., 2016).

Истощение водных ресурсов рек Амударья и Сырдарья, вызванное чрезмерным использованием воды для орошения, привело к экологической катастрофе — высыханию Аральского моря к 2014 году (Dukhovny & Schutter, 2011). Несмотря на сокращение доли сельского хозяйства в ВВП региона со времён Советского Союза (Hamidov et al., 2016), спрос

на воду остаётся высоким, особенно для целей ирригации. Эти проблемы с водоснабжением в сочетании с быстрой индустриализацией повышают риск нехватки воды, особенно во время частых засух, которые влияют на урожайность и могут усилить процессы эрозии и деградации почв (Идрисов, 2023).

Показатель 6.4.2 «Уровень нагрузки на водные ресурсы» Целей устойчивого развития (ЦУР) позволяет оценить уровень водного стресса, означающий интенсивность использования пресной воды в отношении к имеющимся пресноводным ресурсам стран. Он показывает, сколько воды забирается по отношению к общему количеству запасов пресной воды, с учётом экологических потребностей в воде в окружающей среде. Если уровень водного стресса $\geq 100\%$, это означает, что весь доступный объём воды (после учёта экологических потребностей) используется для нужд человека, что свидетельствует о высоком уровне нагрузки на водные ресурсы и риске нехватки воды. Если уровень водного стресса низкий (близок к нулю), это означает, что объём забираемой воды составляет малую долю от общего запаса, и нагрузка на водные ресурсы в этом случае минимальна. Задача выполнения показателя ЦУР 6.4.2 — снизить нагрузку на водные ресурсы в странах до уровня $\leq 25\%$ к 2030 году.

В таблице 5.2.1 представлен уровень нагрузки на водные ресурсы в странах Центральной Азии

и показано, что Туркменистан и Узбекистан испытывают высокую нагрузку, используя все имеющиеся водные ресурсы в нижнем течении бассейнов рек Сырдарья и Амударья в основном для нужд сельского хозяйства, промышленности и питьевого и коммунального водоснабжения, а не для нужд экосистем.

Социально-экономическое развитие стран Центральной Азии тесно связано с наличием водных ресурсов (Абдуллаев и соавт., 2019), что подчёркивает важность эффективности водопользования для экономического роста. Эффективность водопользования, измеряемая показателем ЦУР 6.4.1, показывает экономическую ценность каждого кубометра воды, используемой в трёх основных секторах экономики: а) сельское, лесное и рыбное хозяйство; б) добыча полезных ископаемых, обрабатывающая промышленность, производство энергии и строительство; и в) сфера услуг. Этот показатель помогает понять, насколько эффективно используются водные ресурсы для получения экономических выгод. Низкие значения эффективности свидетельствуют о больших потерях воды и плохом управлении водными ресурсами в этих секторах. Поскольку спрос на воду растёт, а изменение климата делает водные системы более уязвимыми, повышение эффективности водопользования имеет решающее значение для обеспечения продовольственной безопасности и поддержания устойчивого экономического роста в регионе.

Таблица 5.2.1. Уровень нагрузки на водные ресурсы в странах Центральной Азии по состоянию на 2021 год

Страна	Уровень нагрузки на водные ресурсы по состоянию на 2021 год (ЦУР 6.4.2)
Казахстан	34,10 %
Кыргызстан	50,04 %
Таджикистан	69,94 %
Туркменистан	135,21 %
Узбекистан	121,84 %

Источник: составлено автором по данным FAO AQUASTAT

Средний показатель эффективности использования воды в Центральной Азии составляет 3,49 доллара США за кубический метр (FAO AQUASTAT, 2021). Это означает, что в среднем каждый кубометр использованной воды приносит экономике региона 3,49 доллара США. Однако в разных странах эти показатели сильно различаются: в Казахстане этот показатель

достигает 8 долл. США/м³, а в Кыргызстане, Таджикистане, Туркменистане и Узбекистане он ниже — 0,88 долл. США/м³, 1,08 долл. США/м³, 2,03 долл. США/м³ и 2,53 долл. США/м³ соответственно. Для сравнения, среднемировой показатель составляет 20,77 долл. США/м³, а Швейцария достигла впечатляющих 611,43 долл. США/м³.

Для улучшения этого показателя необходимо сократить потери воды при орошении, внедрив более эффективные методы орошения, такие как капельное орошение, сосредоточиться на выращивании менее требовательных к воде культур и в целом улучшить управление водными ресурсами. По сравнению с воздействием изменения климата на криосферу и водные ресурсы, эти шаги являются крайне важными для повышения экономической ценности воды и обеспечения её устойчивого использования

в условиях растущего уровня нагрузки на водные ресурсы. Страны Центральной Азии являются одними из самых высоких потребителей воды на душу населения в мире (Dukhovny & Schutter, 2011). В таблице 5.2.2 показано потребление воды на душу населения в странах Центральной Азии. Средний забор воды на душу населения в год в Центральной Азии составляет 1359,28 м³/год на каждого жителя, по сравнению с общим мировым уровнем забора воды на душу населения в год 504,09 м³/год на каждого жителя.

Таблица 5.2.3. Общий забор воды на душу населения в Центральной Азии

Страна	Общий забор воды на душу населения (м ³ /год на каждого жителя), по годам				
	2017	2018	2019	2020	2021
Казахстан	1335,04	1269,93	1260,30	1294,26	1279,61
Кыргызстан	1251,38	1230,82	1211,33	1192,24	1173,45
Таджикистан	894,96	1070,76	1135,48	1037,39	1015,38
Туркменистан	4834,84	4431,94	4499,22	4198,86	2740,50
Узбекистан	1843,75	1739,25	1636,78	1527,62	1281,11

Источник: составлено автором по данным FAO AQUASTAT

Согласно данным FAO AQUASTAT, общая численность населения стран Центральной Азии увеличилась с 71,3 млн человек в 2017 году до 75,9 млн человек в 2021 году, что отражает среднегодовой прирост по всему региону примерно на 1 млн человек. Исходя из этой тенденции, прогнозируемая численность населения Центральной Азии достигнет 95 миллионов человек к 2040 году, 115 миллионов человек к 2060 году, 135 миллионов человек к 2080 году и 155 миллионов человек к 2100 году. С другой стороны, за последние пять лет среднегодовое потребление воды на душу населения в регионе снизилось примерно на 108,63 кубических метров в год.

Такой демографический рост приводит к значительному увеличению общей потребности в воде, даже если потребление воды на душу населения остаётся неизменным. Однако нынешний уровень потребления на душу населения недостаточен для удовлетворения растущих потребностей в воде. В сочетании с гидрологическими изменениями, включая уменьшение вклада ледников и снеготаяния в речной сток, регион сталкивается с растущей нехваткой воды и нагрузкой на водные ресурсы. Решение этих проблем требует принятия срочных мер по сокращению потребления воды

на душу населения и повышению эффективности водопользования за счёт минимизации потерь.

Ожидается, что совокупный эффект от изменения климата в Центральной Азии будет очень значительным: повышение температуры уже приводит к более раннему таянию снега, увеличению потребности в воде и сокращению сезона орошения. Эти изменения в сочетании с изменениями вклада талых вод со стороны криосферы, вероятно, приведут к более экстремальным наводнениям, засухам и общей нехватке воды (Sara & Proskuryakova, 2022). Нерегулируемое использование воды, особенно для орошения сельскохозяйственных угодий, и его влияние на выработку гидроэлектроэнергии (Schrader et al., 2019) представляют собой дополнительную угрозу для региона. Уровень водохранилищ, необходимый для производства электроэнергии и летнего орошения, также снижается из-за продолжающегося изменения климата. Существующие проблемы, такие как фрагментация управления водными ресурсами, пробелы в нормативно-правовой базе и недостаточное внимание к вопросам экологии и здравоохранения, создают дополнительную нагрузку на обеспеченность стран водными ресурсами. Регион сталкивается с растущей потребностью в воде в связи с ростом населения и экономическим развитием, что создаёт угрозу водной безопасности в регионе.

6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Засушливая зона Центральной Азии представляет собой регион, сталкивающийся со сложным взаимодействием экологических, социальных и экономических проблем. Страны в значительной степени зависят от общих водных ресурсов бассейнов рек Амударья и Сырдарья, которые по большей части питаются за счёт таяния снега и ледников, что делает криосферу важнейшим компонентом водоснабжения региона.

Ожидается, что в течение оставшейся части XXI века ледники в горных хребтах Центральной Азии сохраняют текущую, ускоряющуюся тенденцию потери массы. Согласно анализу результатов Глобальной модели эволюции ледников GloGEM (Huss&Hock, 2015; Bosson et al., 2023) общая потеря объёма льда к 2100 году в регионе составит от 54 до 88 % от общего объёма 2010 года в зависимости от реализации климатического сценария. Хотя на Памире самые высокие и толстые ледники переживут столетие, во многих регионах Тянь-Шаня и в более низких горных бассейнах Памира наблюдается выраженное отступление объёма льда, вплоть до полной дегляциации к концу столетия.

Быстрое изменение состояния ледников повлияет на гидрологический режим горных водосборов. Ожидается, что годовой сток достигнет максимума (из-за усиления таяния) для некоторых водосборов Тянь-Шаня в течение ближайших лет — десятилетия, а затем будет уменьшаться по мере отступления ледников. Сроки наступления такого «пика водности» зависят от современного количества льда (как в абсолютном выражении, так и относительно площади водосбора), поэтому водосборные бассейны на Памире достигнут пика водности позже. В то время как для крупнейших ледниковых комплексов Памира наступление пика водности ожидается после 2100 года, меньшие водосборные бассейны с более скромной степенью оледенения могут уже пройти через максимум стока. В рамках сезонного цикла к 2100 году прогнозируется сильное сокращение стока с ледников в сезон позднего таяния (август — октябрь) на Тянь-Шане — более чем на 30 % от общего стока

бассейна. На Памире, напротив, вклад стока в летний период существенно не уменьшится, но сместится на более ранние периоды сезона.

Все прогнозы будущих изменений состояния ледников сопряжены со значительными неопределённостями, обусловленными неполнотой знаний о климатических и неклиматических факторах баланса массы ледников, а также о сложных цепочках процессов и эффектах ответной реакции, определяющих эволюцию ледников в различных субрегионах (Barandun et al., 2020). Среди конкретных задач — точное моделирование эволюции обломочного покрова ледников (Comragno et al., 2022) и улучшение понимания будущего нестабильных и нелинейно реагирующих ледников в условиях меняющегося климата (Kääb et al., 2023). Важным приоритетом является также более точное ограничение будущих климатических факторов: в настоящее время по всей Центральной Азии наборы данных с координатной привязкой даже о климате прошлого демонстрируют серьёзные расхождения, и в них в значительной степени отсутствуют валидационные данные по интенсивности и сезонности осадков (Schöne et al., 2019; Zandler et al., 2019). Особенно важными для исследований будущего климатического воздействия являются субрегиональные и бассейновые оценки изменений массы ледников и движущих сил таких процессов, а также соответствующих факторов неопределённости — путём сочетания наблюдений *in situ* с методами дистанционного зондирования и применения численных моделей (Barandun et al., 2020).

Необходимость адаптации к меняющемуся климату и, в перспективе, смягчения последствий изменения климата требует более точной информации о взаимодействии атмосферы, океана и суши для более глубокого понимания основных климатических циклов углерода, воды и энергии.

Для разработки национальных планов действий по адаптации к воздействию изменения климата на криосферу и управлению водными ресурсами необходимо сопоставить текущий сценарий вклада стока талых вод ледников с современными тенденциями развития

стран Центральной Азии. Эти тенденции свидетельствуют о росте населения в странах Центральной Азии, которое, согласно статистическим данным, может удвоиться к 2100 году. С другой стороны, предпринимаемые странами усилия по повышению эффективности использования водных ресурсов и сокращению забора воды на душу населения недостаточны по сравнению с темпами роста населения и развития экономики, которые требуют большего количества воды.

Показатели развития, такие как забор воды на душу населения, доля сельскохозяйственного производства в структуре ВВП по стране, объём

воды на единицу ВВП, должны использоваться в качестве рычагов для разработки национальных планов действий, чтобы в большей степени повлиять на корректировку пути развития стран Центральной Азии. Эти действия, направленные на снижение нагрузки на водные ресурсы в процессе экономического развития, позволят усилить механизмы адаптации стран Центральной Азии к будущим изменениям доступности водных ресурсов с помощью научно обоснованных, разумных и эффективных мер, а также ускорить выполнение задач ЦУР 6 на национальном и региональном уровнях, тем самым способствуя укреплению водной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aalstad, K., Westermann, S., Schuler, T. V., Boike, J., & Bertino, L. (2018). Ensemble-based assimilation of fractional snow-covered area satellite retrievals to estimate the snow distribution at Arctic sites. *The Cryosphere*, 12(1), 247–270, <https://doi.org/10.5194/tc-12-247-2018>
2. Aalto, J., Kämäräinen, M., Shodmonov, M., Rajabov, N., & Venäläinen, A. (2017). Features of Tajikistan's past and future climate. *International Journal of Climatology*, 37(14), 4949–4961. doi:10.1002/joc.5135
3. Abdullaev, I., Wegerich, K., Kazbekov, J. (2019). History of water management in the Aral Sea Basin. In *The Aral Sea Basin* (pp. 8–24). Routledge.
4. Adnan, M., Nabi, G., Poomee, M. S., and Ashraf, A. (2017). Snowmelt runoff prediction under changing climate in the Himalayan cryosphere: the case of the Gilgit River Basin: *Geoscience Frontiers*, v. 8, pp. 941–949.
5. Ahmetova G. S., Cherkasov P. A., & Hastenrath S. (1998). Regime of Muravlev Glacier in the Djungarskiy Alatau Range of Kazakhstan, Central Asia. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 34(1), 37–46.
6. Aizen, E. M., Aizen, V. B., Melack, J. M., Nakamura, T., and Ohta, T. (2001). Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia, *Int. J. Climatol.*, 21, 535–556.
7. Aizen, V. B. (2011). Pamir glaciers. *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Edited by: Sigh, V. P. and Singh, P., Haritashya, UK, 813–815.
8. Aizen, V. B., Aizen, E. M., & Melack, J. M. (1996). Precipitation, melt and runoff in the northern Tien Shan. *Journal of Hydrology*, 186(1–4), 229–251. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03022-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03022-3)
9. Aizen, V. B., Aizen, E. M., Melack, J. M., & Dozier, J. (1997). Climatic and hydrologic changes in the Tien Shan, Central Asia: *Journal of Climate*, v. 10, p. 1393–1404.
10. Aizen, V. B., Kuzmichenok, V. A., Surazakov, A. B., & Aizen, E. M. (2007). Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic and remotely sensed data. *Global and Planetary Change*, 56(3–4), 328–340. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.016>
11. Aizen, V. B., Aizen, E. M., & Melack, J. M. (1995). Climate, snow cover, glaciers, and runoff in the Tien Shan, Central Asia. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31(6), 1113–1129. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03426.x>
12. Allen, S. K., Sattar, A., King, O., Zhang, G., Bhattacharya, A., Yao, T., & Bolch, T. (2022). Glacial lake outburst flood hazard under current and future conditions: Worst-case scenarios in a transboundary Himalayan basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(11), 3765–3785. <https://doi.org/10.5194/NHESS-22-3765-2022>
13. Allen, S., Frey, H., Haeberli, W., Huggel, C., Chiarle, M., & Geertsema, M. (2022). Assessment Principles for Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. <https://doi.org/10.1093/ACREFORE/9780199389407.013.356>
14. Archer, D. R. and Fowler, H. J. (2004). Spatial and temporal variations in precipitation in the Upper Indus Basin, global teleconnections and hydrological implications, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 8, 47–61, <https://doi.org/10.5194/hess-8-47-2004>
15. Arenson, L., Jakob, M. (2010). The significance of rock glaciers in the dry Andes — a discussion of Azo´car and Brenning (2010) and Brenning and Azo´car (2010). *Permafrost and Periglacial Processes*. 21: 282–285. DOI: 10.1002/ppp.693
16. Arenson, L. U., Harrington, J. S., Koenig, C. E. M. and Wainstein, P. A. (2022). Mountain Permafrost Hydrology — A Practical Review Following Studies from the Andes. *Geosciences*, 12(48).
17. Armstrong, R. L., Rittger, K., Brodzik, M. J., Racoviteanu, A., Barrett, A. P., Khalsa, S. J. S., Raup, B., Hill, A. F., Khan, A. L., Wilson, A., Kayastha, R. B., Fetterer, F. & Armstrong, B. (2019). Runoff from glacier ice and seasonal snow in High Asia: separating meltwater sources in river flow. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1249–1261. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1429-0>
18. Azisov, E., Hoelzle, M., Vorogushyn, S., Saks, T., Usabaliev, R., Esenaman uulu, M., &

- Barandun, M. (2022). Reconstructed Centennial Mass Balance Change for Golubin Glacier, Northern Tien Shan. *Atmosphere*, 13(6), 954. <https://doi.org/10.3390/atmos13060954>
19. Bair, E. H., Abreu Calfa, A., Rittger, K., and Dozier, J. (2018). Using machine learning for real-time estimates of snow water equivalent in the watersheds of Afghanistan, *The Cryosphere*, 12, 1579–1594, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1579-2018>
20. Bair, E. H., Rittger, K., Ahmad, J. A., & Chabot, D. (2020). Comparison of modeled snow properties in Afghanistan, Pakistan, and Tajikistan. *The Cryosphere*, 14(1), 331–347.
21. Barandun, M., and Pohl, E. (2023). Central Asia's spatiotemporal glacier response ambiguity due to data inconsistencies and regional simplifications. *The Cryosphere*, 17, 1343–1371. <https://doi.org/10.5194/tc-17-1343-2023>
22. Barandun, M., Fiddes, J., Scherler, M., Mathys, T., Saks, T., Petrakov, D., & Hoelzle, M. (2020). The state and future of the cryosphere in Central Asia. *Water Security*, 11, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100072>
23. Barandun, M., Huss, M., Sold, L., Farinotti, D., Azisov, E., Salzmann, N., Usabaliev, R., Merkushkin, A. & Hoelzle, M. (2015). Re-analysis of seasonal mass balance at Abramov glacier 1968–2014. *Journal of Glaciology*, 61(230), 1103–1117.
24. Barandun, M., Huss, M., Usabaliev, R., Azisov, E., Berthier, E., Käab, A., Bolch, T., & Hoelzle, M. (2018). Multi-decadal mass balance series of three Kyrgyz glaciers inferred from modelling constrained with repeated snow line observations. *The Cryosphere*, 12(6), 1899–1919.
25. Barandun, M., Pohl, E., Naegeli, K., McNabb, R., Huss, M., Berthier, E., Saks, T., & Hoelzle, M. (2021). Hot spots of glacier mass balance variability in Central Asia. *Geophysical Research Letters*, 48(11), e2020GL092084. <https://doi.org/10.1029/2020GL092084>
26. Barbone, L., Reva, A., Zaidi, S. (2010). Tajikistan: Key Priorities for Climate Change Adaptation (November 1, 2010). World Bank Policy Research Working Paper No. 5487, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1718245>
27. Barnett, J. (2007). Climate change, human society and violent conflict. *Polit Geogr* 26(6):639–655
28. Barry, R. G. (1992). *Mountain weather and climate*, 2nd edn., Routledge, London, ISBN 9780415071130.
29. Bedford, D. and Tsarev, B. (2001). *Central Asian Snow Cover from Hydrometeorological Surveys, Version 1*, Boulder, Colorado USA, NSIDC: National Snow and Ice Data Center, <https://doi.org/10.7265/N51Z4291>
30. Berger, A. (1978). Long-term variations of caloric solar radiation resulting from the Earth's orbital elements. *Quaternary Res.*, 9: 139–167.
31. Bernauer, T., & Siegfried, T. (2012). Climate change and international water conflict in Central Asia. *Journal of Peace Research*, 49(1), 227–239.
32. Biskaborn, B. K., Smith, S. L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D. A., Schoeneich, P., Romanovsky, V. E., Lewkowicz, A. G., Abramov, A., Allard, M., Boike, J., Cable, W. L., Christiansen, H. H., Delaloye, R., Diekmann, B., Drozdov, D., Etzelmüller, B., Grosse, G., ... Lantuit, H. (2019). Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
33. Bobojonov, I. & Aw-Hassan, A. 2014. Impacts of climate change on farm income security in Central Asia: An integrated modelling approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 188, 245–255.
34. Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T. C., Richter, C., Simmons, A., and Zemp, M., 2014, *The Concept of Essential Climate Variables in Support of Climate Research, Applications, and Policy: Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 95, no. 9, p. 1431–1443.
35. Bolatova, A., Krysanova, V., Lobanova, A., & Bolatov, K. (2023). Assessment of climate change impacts for two tributary basins of the Irtysh River in Kazakhstan. *Climate Research*, 91, 159–174. <https://doi.org/10.3354/cr01726>
36. Bolch, T. (2007). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, 56(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>
37. Bolch, T., & Gorbunov, A. P. (2014). Characteristics and Origin of Rock Glaciers in Northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan).

- Permafrost and Periglacial Processes, 25(4), 320–332. <https://doi.org/10.1002/ppp.1825>
38. Bolch, T., & Marchenko, S. (2009). Significance of glaciers, rock glaciers and ice-rich permafrost in the Northern Tien Shan as water towers under climate change conditions. In Braun, L. N., Hagg, W., Severskiy, I. V., & Young, G. (Eds.), *Proceedings Assessment of Snow, Glacier and Water Resources in Asia*, Almaty, Kazakhstan, 2006 (pp. 132–144). UNESCO-IHP and German IHP/HWRP National Committee.
 39. Bolch, T., Peters, J., Yegorov, A., Pradhan, B., Buchroithner, M., and Blagoveshchensky, V. (2011). Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan: *Natural Hazards*, v. 59, no. 3, pp. 1691–1714.
 40. Bolch, T., Rohrbach, N., Kutuzov, S., Robson, B.A. and Osmonov, A. (2019). Occurrence, evolution and ice content of ice-debris complexes in the Ak-Shiirak, Central Tien Shan revealed by geophysical and remotely-sensed investigations, *Earth Surface Processes and Landforms*, 44, <https://doi.org/10.1002/esp.4487>
 41. Boos, W. R. and Kuang, Z. (2010). Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating, *Nature*, 463, 218–222.
 42. Bosson, J. B., Huss, M., Cauvy-Fraunié, S., Clément, J. C., Costes, G., Fischer, M., ... & Arthaud, F. (2023). Future emergence of new ecosystems caused by glacial retreat. *Nature*, 620(7974), 562–569.
 43. Brhane, E. S., and Dairaku, K. (2023). Changes in climate extremes in Hissar-Allay mountainous region, Tajikistan. *Proceedings of the 19th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS 2022) Singapore*.
 44. Brocard, E., Flubacher, M., Haefliger, M., Hama, M., Lukasczyk, C., Pache, A., Rossa, A., Roulet, Y.-A., (2021) *Kyrgyzhydromet Peer Review Report. Contribution to the road testing of the prototype version of the Country Hydromet Diagnostics (First phase of development of the tool)*, Country Hydromet Diagnostics, Federal Department of Home Affairs FDHA, Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, Operation Center 1 | P.O. Box | CH-8058 Zurich-Airport, p. 29.
 45. Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Kääh, A., & Treichler, D. (2017). A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances, 2000–2016. *Nature Geoscience*, 10(9), 668–673. <https://doi.org/10.1038/ngeo2999>
 46. Brun, F., Wagnon, P., Berthier, E., Jomelli, V., Maharjan, S., Shrestha, F., and Kraaijenbrink, P. (2019). Heterogeneous influence of glacier morphology on the mass balance variability in High Mountain Asia, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 124, 1331–1345.
 47. Bühler, Y., Marty, M., Egli, L., Veitinger, J., Jonas, T., Thee P., and Ginzler, C., (2015) Snow depth mapping in high-alpine catchments using digital photogrammetry. *The Cryosphere*, 9, 229–243.
 48. Cadet, D. (1979). Meteorology of the Indian summer monsoon, *Nature*, 279, 761–767.
 49. Callegari, M., Carturan, L., Marin, C., Notarnicola, C., Rastner, P., Seppi, R., & Zucca, F. (2016). A Pol-SAR Analysis for Alpine Glacier Classification and Snowline Altitude Retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(7), 3106-3121. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2587819>
 50. Cao, M. S. (1998). Detection of abrupt changes in glacier mass balance in the Tien Shan Mountains. *Journal of Glaciology*, 44(147), 352–358. <https://doi.org/10.1017/S0022143000002677>
 51. Cassara, M., Beekma, J., de Strasser, L., Anarbekov, O., Murzaeva, M., Giska, S., & Dörre, A. (2019). Local and national institutions and policies governing water resources management. In *The Aral Sea basin* (pp. 136-154). Routledge.
 52. Chen, Y., Li, W., Deng, H., Fang, G., & Li, Z. (2016). Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future. *Scientific Reports*, 6(1), 35458. <https://doi.org/10.1038/srep35458>
 53. Chevallier, P., Pouyau, B., Mojaïsky, M., Bolgov, M., Olsson, O., Bauer, M., and Froebrich, J. (2014). River flow regime and snow cover of the Pamir Alay (Central Asia) in a changing climate. *Hydrological Sciences Journal*. 59:8, 1491–1506, DOI:10.1080/0262667.2013.838004
 54. Compagno, L. & Huss, M. & Miles, E. & McCarthy, M. & Zekollari, H. & Dehecq, A. & Pellicciotti, F. & Farinotti, D. (2022). Modelling supraglacial debris-cover evolution from the single-glacier to the regional scale: an application to High Mountain Asia. *The Cryosphere*. 16. 1697–1718, doi:10.5194/tc-16-1697-2022.
 55. Compagno, L., Huss, M., Zekollari, H., Miles, E. S. & Farinotti, D. (2022). Future growth and decline of high mountain Asia's ice-dammed

- lakes and associated risk. *Commun. Earth Environ.* 3, 191.
56. Compagno, L., Zekollari, H., Huss, M. & Farinotti, D. (2021). Limited impact of various climate datasets on future glacier evolution in Scandinavia and Iceland. *J. Glaciol.* 67, 727–743.
57. Consortium, R., Randolph Glacier Inventory (RGI). (2017). A Dataset of Global Glacier Outlines, G.L.I.M.f. Space. Global Land Ice Measurements from Space: Boulder, Colorado, USA.
58. Daanen, R. P., Ingeman-Nielsen, T., Marchenko, S. S., Romanovsky, V. E., Foged, N., Stendel, M., Christensen, J. H., and Hornbech Svendsen, K. (2011). Permafrost degradation risk zone assessment using simulation models, *The Cryosphere*, 5, 1043–1056, <https://doi.org/10.5194/tc-5-1043-2011>
59. Dayrov M., Ballab Kattel D., Narama C., Wang W. (2022). Evaluating the variability of glacial lakes in the Kyrgyz and Teskey ranges, Tien Shan. *Front. Earth Sci.*, 08 August 2022 Sec. Cryospheric Sciences. Volume 10 — 2022. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.850146>
60. De Stefano, L., Petersen-Perlman, J. D., Sproles, E. A., Eynard, J., & Wolf, A. T. (2017). Assessment of transboundary river basins for potential hydro-political tensions. *Global Environmental Change*, 45, 35–46.
61. Dehecq, Amaury & Gourmelen, Noel & Trouvé, Emmanuel. 2015. Deriving large-scale glacier velocities from a complete satellite archive: Application to the Pamir–Karakoram–Himalaya. *Remote Sensing of Environment*. 162. 10.1016/j.rse.2015.01.031.
62. Delaloye, R., Lambiel, C. (2005). Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps), *Norwegian Journal of Geography* 59 (2), 194–203.
63. Delaloye, R., Lambiel, C., and Gärtner-Roer, I. (2010). Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps: *Swiss Journal of Geography*, v. 65, no. 2, pp. 135–145.
64. Denzinger, F., Machguth, H., Barandun, M., Berthier, E., Girod, L., Kronenberg, M., Usabaliev, R., Hoelzle, M. (2021). Geodetic mass balance of Abramov Glacier from 1975 to 2015. *Journal of Glaciology*, 67(262), 331–342. doi:10.1017/jog.2020.108
65. Dietz, A., Conrad, C., Kuenzer, C., Gesell, G., Dech, S. (2014). Identifying changing snow cover characteristics in Central Asia between 1986 and 2014 from remote sensing data. *2014. Remote Sens.* 2014, 6(12), 12752–12775; <https://doi.org/10.3390/rs61212752>
66. Dietz, A. J., Kuenzer, C., & Conrad, C. (2013). Snow-cover variability in central Asia between 2000 and 2011 derived from improved MODIS daily snow-cover products. *International Journal of Remote Sensing*, 34(11), 3879–3902. doi:10.1080/01431161.2013.767480
67. Djumaboev, K., Anarbekov, O., Holmatov, B., Hamidov, A., Gafurov, Z., Murzaeva, M., Susnik, J., Maskey, S., Mehmood, H., Smakhtin, V. (2019). Surface water resources. In *The Aral Sea Basin* (pp. 25–38). Routledge.
68. Dozier, J. (1997). Climatic and Hydrologic Changes in the Tien Shan, Central Asia. *Journal of Climate*, 10(6):1393–1404.
69. Dozier, J., Bair, E. H., and Davis, R. E. (2016). Estimating the spatial distribution of snow water equivalent in the world's mountains. *WIREs Water*, 2016. 3: p. 461–474. <https://doi.org/10.1002/wat2.1140>
70. Duan, W., Chen, Y., Zou, S., Nover, D., (2019). Managing the water-climate- food nexus for sustainable development in Turkmenistan. *Journal of Cleaner Production*, 220, 212–224.
71. Dukhovny Victor, Sokolov Vadim (2003) *Lessons on Cooperation Building to Manage Water Conflicts in the Aral Sea Basin*. Paris: UNESCO.
72. Dukhovny, V. A. & de Schutter, J. (2011). *Water in Central Asia, Past, Present, Future*. Routledge, Tayler & Francis Group.
73. Dyurgerov, M. (2002). *Glacier mass balance and regime: data of measurement and analysis*. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, p. 88.
74. Ehlschlaeger, C. (1989). Using the AT Search Algorithm to Develop Hydrologic Models from Digital Elevation Data, *Proceedings of International Geographic Information Systems (IGIS) Symposium '89*, pp. 275–281 (Baltimore, MD, 18–19 March 1989).
75. Erokhin, S. A., Zaginaev, V. V., Meleshko, A. A., Ruiz-Villanueva, V., Petrakov, D., Chernomorets, S. S., Viskhadzhieva, S. K., Tutubalina, O., and Stoffel, M. (2018). Debris flows triggered from non-stationary glacier lake outbursts: the case of the Teztor Lake complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan): *Landslides*, v. 15, no. 1, pp. 83–98.
76. Eyring, V. et al. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

- experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9, 1937–1958.
77. Farinotti, D. et al. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nat. Geosci.* 12, 168–173.
 78. Farinotti, D., Longuevergne, L., Moholdt, G., Duethmann, D., Mölg, T., Bolch, T., Vorogushin, S., Güntner, A. (2015). Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 8(9), 716–722. doi:10.1038/ngeo2513
 79. Fay, M., and Patel, H. (2008). A Simple Index of Vulnerability to Climate Change. Background paper prepared for report, World Bank, Washington, DC.
 80. Fiddes, J., Aalstad, K., and Westermann, S. (2019) 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>
 81. Finaev, A., Liu, S., Bao, W., Li, J. (2016). Climate change and water potential of the Pamir Mountains.” *Geography, Environment, Sustainability* 9.3: 88-105. https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v09_2016_06
 82. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2016). Country Water Report, Rome.
 83. Forsythe, N., Fowler, H. J., Li, X.-F., Blenkinsop, S., and Pritchard, D. (2017). Karakoram temperature and glacial melt driven by regional atmospheric circulation variability: *Nature Climate Change*, v. 7, pp. 664–670.
 84. Gafforzoda, I. G., Arabov, F. P., & Sodikov, A. K. (2023, August). Sustainable development of water resources of Tajikistan. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (1229(1):012024). IOP Publishing.
 85. Gafurov, A., & Bårdossy, A. (2009). Cloud removal methodology from MODIS snow cover product: *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 13, no. 7, p. 1361–1373.
 86. Gafurov, A., Kriegel, D., Vorogushyn, S., & Merz, B. (2013). Evaluation of remotely sensed snow cover product in Central Asia. *Hydrology Research*, 44(3), 506–522.
 87. Gafurov, A., Lüdtkke, S., Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Schöne, T., Schmidt, S., Kalashnikova, O. and Merz, B. (2016). MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data. *Environmental Earth Sciences*, 75(14): 1–15.
 88. Gan, R., Luo, Y., Zuo, Q., & Sun, L. (2015). Effects of projected climate change on the glacier and runoff generation in the Naryn River Basin, Central Asia. *Journal of Hydrology*, 523, 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.057>
 89. Garcia, C. R., & Brown, S. (2009). Assessing water use and quality through youth participatory research in a rural Andean watershed. *Journal of Environmental Management*, 90(10), 3040–3047. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.04.014
 90. Gardner, A. S., Moholdt, G., Cogley, J. G., Wouters, B., Arendt, A. A., Wahr, J., Berthier, E., Hock, R., Pfeffer, W. T., Kaser, G., Ligtenberg, S. R. M., Bolch, T., Sharp, M. J., Hagen, J. O., van den Broeke, M. R., & Paul, F. (2013). A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. *Science*, 340(6134), 852–857. <https://doi.org/10.1126/science.1234532>
 91. GCOS, 2010, Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 update). 2016, The Global Observing System for Climate: Implementation Plan.
 92. Gerlitz, I., Steirou, E., Schneider, C., Moron, V., Vorogushyn, S. & Merz, B. (2018). Variability of the Cold Season Climate in Central Asia. Part I: Weather Types and Their Tropical and Extratropical Drivers. *Journal of Climate*, 31, 7185-7207.
 93. Giesen, R. H., and Oerlemans, J. (2013). Climate-model induced differences in the 21st century global and regional glacier contributions to sea-level rise. *Clim. Dyn.* 41, 3283–3300. doi: 10.1007/s00382-013-1743-7
 94. Gilbert, A., Vincent, C., Gagliardini, O., Krug, J., and Berthier, E. (2015). Assessment of thermal change in cold avalanching glaciers in relation to climate warming, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 6382–6390, doi:10.1002/2015GL064838.
 95. Giorgi, F. (2006). Climate change hot spots. *Geophysical research letters*, 33(8). Gleick, P.H. and M. Palaniappan, Peak water limits to freshwater withdrawal and use. *Proceeding of National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 2010. 107: p. 11155–11162. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004812107>
 96. Glantz, M. (1999). *Creeping environmental problems and sustainable development in the Aral Sea Basin*. Cambridge University Press, Cambridge 5.
 97. Glazovsky, N. (1995). *The Aral Sea basin. Regions at Risk: Comparisons of Threatened*

- Environments. Tokyo, New York, Paris: United Nations University Press.
98. Goerlich, F., Bolch, T., and Paul, F. 2020. More dynamic than expected: an updated survey of surging glaciers in the Pamir, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3161–3176, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3161-2020>
99. Gorbunov, A. P., Marchenko, S. S. and Seversky, E. V. (2004). The thermal environment of blocky materials in the mountains of Central Asia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15: 95–98.
100. Gruber, F. E., & Mergili, M. (2013). Regional-scale analysis of high-mountain multi-hazard and risk indicators in the Pamir (Tajikistan) with GRASS GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2779–2796. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2779-2013>
101. Gruber, S. (2012). Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, 6(1), 221–233. <https://doi.org/10.5194/tc-6-221-2012>
102. Gruber, S., Haeberli, W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112(F2). doi:10.1029/2006jf000547
103. Gugerli, R., Desilets, D. and Salzmann, N. (2022). Brief communication: Application of a muonic cosmic ray snow gauge to monitor the snow water equivalent on alpine glaciers. *The Cryosphere*, 16(3): 799–806.
104. Gugerli, R., Guidicelli, M., Gabella, M., Huss, M. and Salzmann, N. (2021). Multi-sensor Analysis of Monthly Gridded Snow Precipitation on Alpine Glaciers. *Advance in Science and Research*, 18: 7–20.
105. Gugerli, R., Salzmann, N., Huss, M. and Desilets, D. (2019). Continuous and autonomous snow water equivalent measurements by a cosmic ray sensor on an alpine glacier. *The Cryosphere*, 13(12): 3413–3434.
106. Gulahmadov, N. (2022). Analysis of climatic variables in the upper reaches of the Amu Darya River basin in Tajikistan (in Russian). *Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University*, pp 76-85.
107. Gulahmadov, N., Chen, Y., Gulahmadov, A., Rakhimova, M., Gulahmadov, M. (2021). Quantifying the Relative Contribution of Climate Change and Anthropogenic Activities on Runoff Variations in the Central Part of Tajikistan in Central Asia. *Land* 2021, 10, 525. <https://doi.org/10.3390/land10050525>
108. Gulahmadov, N., Chen, Y., Gulahmadov, M., Satti, Z., Naveed, M., Davlyatov, R., ... & Gulahmadov, A. (2023). Assessment of Temperature, Precipitation, and Snow Cover at Different Altitudes of the Varzob River Basin in Tajikistan. *Applied Sciences*, 13(9), 5583.
109. Guo, D., Wang, H. and Li, D. (2012). A projection of permafrost degradation on the Tibetan Plateau during the 21st century, *Journal of Geophysical Research*, 117, <https://doi.org/10.1029/2011JD016545>
110. Haag, I., Jones, P. D., and Samimi, C. (2019). Central Asia's Changing Climate: How Temperature and Precipitation Have Changed across Time, Space, and Altitude, *Climate*, 7, 123, <https://doi.org/10.3390/cli7100123>
111. Haeberli, W. (1992). Construction, environmental problems and natural hazards in periglacial mountain belts *Permaf. Periglac. Process.* 3 111–24
112. Haeberli, W. (2017). Integrative modelling and managing new landscapes and environments in de-glaciating mountain ranges: An emerging trans-disciplinary research field. *Forestry Research and Engineering: International Journal*, 1(1). <https://doi.org/10.15406/freij.2017.01.00005>
113. Haeberli, W., Noetzli, J., Arenson, L., Delaloye, R., Gärtner-Roer, I., Gruber, S., Isaksen, K., Kneisel, C., Krautblatter, M., and Phillips, M., (2010). Mountain permafrost: Development and challenges of a young research field: *Journal of Glaciology*, v. 56, no. 200, p. 1040–1058.
114. Haeberli, W., Schaub, Y., & Huggel, C. (2017). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293, 405–417. doi:10.1016/j.geomorph.2016.02.009
115. Hagg, W., Braun, L., Kuhn, M., and Nesgaard, T. I. (2007). Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments: *Journal of Hydrology*, v. 332, pp. 40–53.
116. Hagg, W., Hoelzle, M., Wagner, S., Mayr, E., and Klose, Z. (2013). Glacier and runoff changes in the Rukhk catchment, upper Amu-Darya basin until 2050: *Global and Planetary Change*, v. 110, pp. 62–73.
117. Halla, C., Blöthe, J. H., Tapia Baldis, C., Trombotto Liudat, D., Hilbich, C., Hauck, C.,

- Schrott, L. (2021). Ice content and interannual water storage changes of an active rock glacier in the dry Andes of Argentina, *The Cryosphere*, 15, 1187–1213, <https://doi.org/10.5194/tc-15-1187-2021>
118. Hamidov, A., Helming, K., & Balla, D. (2016). Impact of agricultural land use in Central Asia: a review. *Agronomy for sustainable development*, 36, 1–23.
119. Harris, C., Haeberli, W., Vonder Mühll, D. and King, L. 2001. Permaf. Periglac. Process. Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: the PACE Project in its global context, 12, 3–11.
120. Hersbach, H., et al. (2020). The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
121. Hill, A. F., Minbaeva, C. K., Wilson, A. M., Satylkanov, R. (2017). Hydrologic controls and water vulnerabilities in the Naryn River Basin, Kyrgyzstan: A socio-hydro case study of water stressors in Central Asia. *Water*, 9(5), 325.
122. Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K., and Luoto, M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure: *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 3, no. 1, p. 24–38.
123. Hock, R. (1999). A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *J. Glaciol.* 45 (149), 101–111.
124. Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *J. Hydrol.* 282, 104–115.
125. Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääb, S. Kang, S. Kutuzov, A. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove, and H. Steltzer. (2019). High Mountain Areas. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer N. M. (eds.)]
126. Hoelzle, M., Azisov, E., Barandun, M., Huss, M., Farinotti, D., Gafurov, A., Hagg, W., Kenzhebaev, R., Kronenberg, M., Machguth, H., Merkushev, A., Moldobekov, B., Petrov, M., Saks, T., Salzmann, N., Schöne, T., Tarasov, Y., Usubaliev, R., Vorogushyn, S., Yakovlev, A., Zemp, M. (2017). Re-establishing glacier monitoring in Kyrgyzstan and Uzbekistan, *Central Asia. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 6(2), 397–418. doi:10.5194/gi-6-397-2017
127. Hoelzle, M., Barandun, M., Bolch, T., Fiddes, J., Gafurov, A., Muccione, V., Saks, T., & Shahgedanova, M. (2019). The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia. In *The Aral Sea Basin* (pp. 100–121). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429436475-8>
128. Hoelzle, M., Mittaz, C., Etzelmüller, B., & Haeberli, W. (2001). Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain areas: an overview of current developments. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1), 53–68. doi:10.1002/ppp.385
129. Huang, A., Zhou, Y., Zhang, Y., Huang, D., Zhao, Y. & Wu, H. 2014. Changes of the Annual Precipitation over Central Asia in the Twenty-First Century Projected by Multimodels of CMIP5. *Journal of Climate*, 27, 6627–6646.
130. Huggel, C., Zraggen, Oswald, S., Haeberli, W., Kääb, A., Polkvoj, A., Galushkin, I., Evans, G. S. (2005). The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of Quick Bird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 173–187.
131. Hugonnet, R. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* 592, 726–731 (2021).
132. Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F., Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
133. Huss, M. & Hock, R. (2015). A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science* 3, 54.
134. Huss, M. & Hock, R. A new model for global glacier change and sea-level rise. *Front. Earth Sci.* 3, 54 (2015).
135. Huss, M., & Hock, R. (2015). A new model for estimating the seasonal mass balance of glaciers. *The Cryosphere*, 9(4), 1399–1413.
136. Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135–140. doi:10.1038/s41558-017-0049-x
137. Huss, M., and Farinotti, D. (2012). Distributed ice thickness and volume of all glaciers around

- the globe. *J. Geophys. Res.* 117: F04010. doi: 10.1029/2012JF002523
138. Huss, M., Bauder, A., & Funk, M. (2009). Homogenization of long-term mass-balance time series. *Annals of Glaciology*, 50(50), 198–206.
139. Huss, M., Bauder, A., Funk, M., Hock, R. (2008). Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *J. Geophys. Res.* 113 (F1):2156–2202, F01015. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JF000803>
140. Huss, M., Jouvét, G., Farinotti, D. & Bauder, A. (2010). Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 815–829.
141. Ibatullin, S., & Ziganshina, D. (2019). The future of water resources, in Xenarios, S., Schmidt-Vogt, D., Qadir, M., Janusz-Pawletta, B., and Abdullaev, I., eds., *The Aral Sea Basin: Water for Sustainable Development in Central Asia*: London and New York, Routledge Publisher, p. 176–196.
142. Immerzeel, W. W., Droogers, P., de Jong, S. M., Bierkens, M. F. P. (2009). Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing: *Remote Sensing of Environment*, v. 113, pp. 40–49.
143. Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. D., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernandez, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T. H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A. B., Viviroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T., Baillie, J. E. M. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577(7790), 364–369. doi:10.1038/s41586-019-1822-y
144. Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., ... & Baillie, J. E. M. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577(7790), 364–369.
145. Immerzeel, W. W., van Beek, L. P., & Bierkens, M. F. (2010). Climate change will affect the Asian water towers: *Science*, v. 328, no. 5984, p. 1382–1385.
146. Immerzeel, W., Wanders, N., Lutz, A., Shea, J., & Bierkens, M. (2015). Reconciling high-altitude precipitation in the upper Indus basin with glacier mass balances and runoff. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(11), 4673–4687. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4673-2015>
147. Information sheet No. 2 for the second quarter of 2021 ANEC. (2021).
148. IPCC. (2001). *Climate Change: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge: Cambridge University Press.
149. IPCC. (2007). *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
150. IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
151. Issaldayeva, S., Alimkulov, S., Raimbekova, Z., Bekseitova, R., & Karatayev, M. (2023). The climatic and river runoff trends in Central Asia: The case of Zhetysu Alatau region, the south-eastern part of Kazakhstan. *Heliyon*, 9(7), e17897. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17897>
152. Janke, J. R., Ng, S., & Bellisario, A. (2017). An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile. *Geomorphology*, 296, 142–152. doi:10.1016/j.geomorph.2017.09.002
153. Jarvis, J., Reuter, H., Nelson, A., and Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the Globe Version 4, Available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m Database.
154. Jin, X.-Y., Jin, H.-J., Iwahana, G., Marchenko, S. S., Luo, D.-L., Li, X.-Y., and Liang, S.-H., 2021, Impacts of climate-induced permafrost degradation on vegetation: A review. *Advances in Climate Change Research*, v. 12, no. 1, p. 29–47.
155. Jones, D. B., Harrison, S., Anderson, K., & Betts, R. A. (2018). Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. *Scientific Reports*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w>
156. Jones, D. B., Harrison, S., Anderson, K., Selley, H. L., Wood, J. L., & Betts, R. A. (2018). The distribution and hydrological significance of rock glaciers in the Nepalese Himalaya. *Global and Planetary Change*, 160, 123–142. doi:10.1016/j.gloplacha.2017.11.005
157. Kääh, A., Bazilova, V., Leclercq, P., Mannerfelt, E., & Strozzi, T. (2023). Global

- clustering of recent glacier surges from radar backscatter data, 2017–2022. *Journal of Glaciology*, 1-9. doi:10.1017/jog.2023.35
158. Kääh, A., Berthier, E., Nuth, C., Gardelle, J., & Arnaud, Y. (2012). Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. *Nature*, 488(7412), 495–498. <https://doi.org/10.1038/nature11324>
159. Kääh, A., Strozzi, T., Bolch, T., Caduff, R., Trefall, H., Stoffel, M., & Kokarev, A. (2021). Inventory and changes of rock glacier creep speeds in Ile Alatau and Kungöy Ala-Too, northern Tien Shan, since the 1950s. *The Cryosphere*, 15(2), 927–949. <https://doi.org/10.5194/tc-15-927-2021>
160. Kääh, A., Treichler, D., Nuth, C., and Berthier, E. (2015). Brief Communication: Contending estimates of 2003–2008 glacier mass balance over the Pamir–Karakoram–Himalaya. *The Cryosphere*, 9, 557–564, <https://doi.org/10.5194/tc-9-557-2015>
161. Kaldybayev A. A., & Chen Yaning. (2022). Assessment of changes in the area of glaciers in the northern part of the Zhetysu Alatau based on remote sensing data. *Bulletin of KazNU, Geographical Series*, 3(66). <https://doi.org/10.26577/JGEM.2022.v66.i3.01>
162. Kaldybayev, A., Chen, Y., & Vilesov, E. (2016). Glacier change in the Karatal river basin, Zhetysu (Dzhungar) Alatau, Kazakhstan. *Annals of Glaciology*, 57(71), 11–19. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A005>
163. Kapitsa, V., Shahgedanova, M., Machguth, H., Severskiy, I., & Medeu, A. (2017). Assessment of evolution and risks of glacier lake outbursts in the Djungarskiy Alatau, Central Asia, using Landsat imagery and glacier bed topography modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(10), 1837–1856. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1837-2017>
164. Kapitsa, V., Shahgedanova, M., Severskiy, I., Kasatkin, N., White, K., & Usmanova, Z. (2020). Assessment of Changes in Mass Balance of the Tuyuksu Group of Glaciers, Northern Tien Shan, between 1958 and 2016 Using Ground-Based Observations and Pléiades Satellite Imagery. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00259>
165. Karatayev, M., Clarke, M., Salnikov, V., Bekseitova, R., & Nizamova, M. (2022). Monitoring climate change, drought conditions and wheat production in Eurasia: the case study of Kazakhstan. *Heliyon*, 8(1), e08660. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08660>
166. Karatayev, M., Kapsalyamova, Z., Spankulova, L., Skakova, A., Movkebayeva, G., & Kongyrbay, A. (2017b). Priorities and challenges for a sustainable management of water resources in Kazakhstan. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 9, 115–135.
167. Karatayev, M., Rivotti, P., Mourão, Z. S., Konadu, D. D., Shah, N., & Clarke, M. (2017a). The water-energy-food nexus in Kazakhstan: challenges and opportunities. *Energy Procedia*, 125, 63–70.
168. Karthe, D., Lin, P. Y., Westphal, K. (2017). Gradients of water hygiene in the holtemme, a small headwater stream in the Elbe River Basin, Northern Germany. *Front Earth Sci* 11(3):544–553. doi:10.1007/s11707-017-0648-x
169. Kaser, G., Großhauser, M., & Marzeion, B. (2010). Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(47), 20223–20227. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008162107>
170. Kenner, R., Noetzli, J., Hoelzle, M., Raetzo, H., & Phillips, M. (2019). Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 13(7), 1925–1941. doi:10.5194/tc-13-1925-2019
171. Kenzhebaev, R., Barandun, M., Kronenberg, M., Chen, Y., Usabaliev, R., & Hoelzle, M. (2017). Mass balance observations and reconstruction for Batysh Sook Glacier, Tien Shan, from 2004 to 2016. *Cold Regions Science and Technology*, 135, 76–89.
172. Khakimov, P., Aliev, J., Thomas, T., Ilyasov, J., Dunston, S. (2020). Climate Change Effects on Agriculture and Food Security in Tajikistan. // *Silk Road: A Journal of Eurasian Development*. — 2020. — T. 2. — №. 1. — p. 89–112.
173. Kobuliev, M., Liu, T., Kobuliev, Z., Chen, X., Gulakhmadov, A., Bao, A. (2021). Effect of future climate change on the water footprint of major crops in southern Tajikistan, *Regional Sustainability*. Volume 2, Issue 1, pp. 60–72, <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2021.01.004>
174. Kokarev, A., Schesterova, I., & Schröder, H. (1997). Die blockgletscher im Sailsijskij Alatau des Tienschan (Kasachstan). *Hallesches Jahrb. Geowiss*, 19, 81–94.
175. Konovalov, V. G., Shchetinnicov, A. S. (1994). Evolution of glaciation in the Pamiro-Alai mountains and its effect on river run-off. *Journal*

- of *Glaciology*, 40(134): p. 149-157. <https://doi.org/10.3189/S0022143000003920>
176. Koven, C. D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G., Tarnocai, C. (2011). Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(36), 14769–14774. doi:10.1073/pnas.1103910108
177. Kraaijenbrink, P. D. A., Bierkens, M. F. P., Lutz, A. F., & Immerzeel, W. W. (2017). Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. *Nature*, 549(7671), 257–260. <https://doi.org/10.1038/nature23878>
178. Kraaijenbrink, P. D., Stigter, E. E., Yao, T., & Immerzeel, W. W. (2021). Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply. *Nature Climate Change*, 11(7), 591-597.
179. Krasznai, M. (2019). *Transboundary water management. The Aral Sea Basin: Water for Sustainable Development in Central Asia*: London and New York, Routledge Publisher, p. 122–135.
180. Krautblatter, M., Huggel, C., Deline, P., & Hasler, A. (2012). Research Perspectives on Unstable High-alpine Bedrock Permafrost: Measurement, Modelling and Process Understanding. *Permafrost and Periglacial Processes*, 23(1), 80–88. doi:10.1002/ppp.740
181. Kriegel, D., Mayer, C., Hagg, W., Vorogushyn S., Duethmann, D., Gafurov, A., Farinotti, D. (2013). Changes in glacierisation, climate and runoff in the second half of the 20th century in the Naryn basin, Central Asia. *Glob Planet Change* 110:51–61. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.05.014
182. Kronenberg, M., Barandun, M., Hoelzle, M., Huss, M., Farinotti, D., Azisov, E., Usabaliev, R., Gafurov, A., Petrakov, D. & Kääh, A. (2016). Mass-balance reconstruction for Glacier No. 354, Tien Shan, from 2003 to 2014. *Annals of Glaciology*, 57(71), 92-102.
183. Kronenberg, M., Barandun, M., Hoelzle, M., Huss, M., Farinotti, D., Azisov, E., Usabaliev, R., Gafurov, A., Petrakov, D. & Kääh, A. (2016). Mass-balance reconstruction for Glacier No. 354, Tien Shan, from 2003 to 2014. *Annals of Glaciology*, 57(71), 92–102. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A032>
184. Kronenberg, M., Machguth, H., Eichler, A., Schwikowski, M., & Hoelzle, M. (2021). Comparison of historical and recent accumulation rates on Abramov Glacier, Pamir Alay. *Journal of Glaciology*, 67(262), 253–268. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.103>
185. Kronenberg, M., van Pelt, W., Machguth, H., Fiddes, J., Hoelzle, M., & Pertziger, F. (2022). Long-term firn and mass balance modelling for Abramov Glacier in the data-scarce Pamir Alay. *The Cryosphere*, 16(12), 5001–5022.
186. Kure, S., Jang, S., Ohara, N., Kavvas, M. L., Chen, Z. Q. (2013). Hydrologic impact of regional climate change for the snowfed and glacierfed river basins in the Republic of Tajikistan: hydrological response of flow to climate change: *Hydrological Processes*, v. 27, no. 26, pp. 4057–4070.
187. Kutuzov, S., & Shahgedanova, M. (2009). Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatoo, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century. *Global and Planetary Change*, 69(1–2), 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.07.001>
188. Lambrecht, A., Mayer, C., Aizen, V., Floricioiu, D., & Surazakov, A. (2014). The evolution of Fedchenko glacier in the Pamir, Tajikistan, during the past eight decades. *Journal of Glaciology*, 60(220), 233–244. doi:10.3189/2014JoG13J110
189. Lambrecht, A., Mayer, C., Bohleber, P., & Aizen, V. (2020). High altitude accumulation and preserved climate information in the western Pamir, observations from the Fedchenko Glacier accumulation basin. *Journal of Glaciology*, 66(256), 219-230.
190. Lambrecht, A., Mayer, C., Wendt, A., Floricioiu, D., & Völkse, C. (2018). Elevation change of Fedchenko Glacier, Pamir Mountains, from GNSS field measurements and TanDEM-X elevation models, with a focus on the upper glacier. *Journal of Glaciology*, 64(246), 637–648. doi:10.1017/jog.2018.52
191. Li, J., Li, Z., Zhu, J., Li, X., Xu, B., Wang, Q., Huang, C., Hu, J. (2017). Early 21st century glacier thickness changes in the Central Tien Shan. *Remote Sens. Environ.* 192, 12–29.
192. Li, Q., Yang, T., Zhang, F., Qi, Z., & Li, L. (2019). Snow depth reconstruction over last century: Trend and distribution in the Tianshan Mountains, China. *Global and Planetary Change*, 173, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.12.008>
193. Li, Y., Zhang, D., Andreeva, M., Li, Y., Fan, L., & Tang, M. (2020a). Temporal-spatial variability of modern climate in the Altai Mountains during

- 1970-2015. PLOS ONE, 15(3), e0230196. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230196>
194. Li, Z., Chen, Y., Li, Y., & Wang, Y. (2020b). Declining snowfall fraction in the alpine regions, Central Asia. *Scientific Reports*, 10(1), 3476. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60303-z>
195. Library of Congress. (2007). Country Profile: Tajikistan, January 2007. <https://www.loc.gov/rr/frd/cs/profiles/Tajikistan-new.pdf>
196. Lin, Z., Wu, Q., Marchenko, S., and Sharkhuu, N. (2010). Thermal State of Permafrost and Active Layer in Central Asia during the International Polar Year: Permafrost and Periglacial Processes, v. 21, p. 198–207.
197. Lioubimtseva, E. (2002). Arid environments. *Physical Geography of Northern Eurasia*. Oxford: Oxford University Press, pp. 267–283.
198. Lioubimtseva, E. Cole, R., (2006). Uncertainties of Climate Change in Arid Environments of Central Asia. *Reviews in Fisheries Science*, 14:1–2, 29–49.
199. Lioubimtseva, E., & Henebry, G. M. (2009). Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations. *Journal of Arid Environments*, 73(11), 963–977.
200. Lutz, A. F., Immerzeel, W. W., Shrestha, A. B., & Bierkens, M. F. P. (2014). Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change*, 4(7), 587–592. <https://doi.org/10.1038/nclimate2237>
201. Lv, M., Guo, H., Lu, X., Liu, G., Yan, S., Ruan, Z., Ding, Y., and Quincey, D. J. 2019. Characterizing the behaviour of surge- and non-surge-type glaciers in the Kingata Mountains, eastern Pamir, from 1999 to 2016, *The Cryosphere*, 13, 219–236. <https://doi.org/10.5194/tc-13-219-2019>
202. Ma, Q. and Oguchi, T.: State of rock glaciers in the Rushan Range of Tajikistan, Western Pamir. (2022). 10th International Conference on Geomorphology, Coimbra, Portugal, 12–16 Sep 2022, ICG2022-394, <https://doi.org/10.5194/icg2022-394>
203. Machguth, H., Eichler, A., Schwikowski, M., Brüttsch, S., Mattea, E., Kutuzov, S., ... & Kronenberg, M. (2024). Fifty years of firn evolution on Grigoriev ice cap, Tien Shan, Kyrgyzstan. *The Cryosphere*, 18(4), 1633–1646.
204. Malsy, M., Aus Der Beek, T., Eisner, S., Florke, M., (2012). Climate change impacts on Central Asian water resources. *Adv. Geosci.* 32, 77–83.
205. Mamadjanova, G., Wild, S., Walz, M. A. & Leckebusch, G. C. (2018). The role of synoptic processes in mudflow formation in the piedmont areas of Uzbekistan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 2893–2919.
206. Manandhar, S., Xenarios, S., Schmidt-Vogt, D., Hergarten, C., & Foggini, M. (2018). Climate vulnerability & adaptive capacity of mountain societies in Central Asia Mountain Societies Research Institute. University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan.
207. Mankin, J. S., & Diffenbaugh, N. S. (2015). Influence of temperature and precipitation variability on near-term snow trends. *Climate Dynamics*, 45, 1099–1116.
208. Mankin, J. S., et al., The potential for snow to supply human water demand in the present and future. *Environmental Research Letters*, (2015). 10: p. 114016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/114016>
209. Mannig, B., Müller, M., Starke, E., Merckenschlager, C., Mao, W., Zhi, X., Podzun, R., Jacob, D., Paeth, H. (2013). Dynamical downscaling of climate change in Central Asia. *Glob Planet Change* 110:26–39. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.05.008
210. Marchenko, S. S. (2001). A model of permafrost formation and occurrences in the intracontinental mountains. *Norwegian Journal of Geography*, 55(4): 230–234.
211. Marchenko, S. S. (2003). Borehole and active-layer monitoring in the northern Tien Shan (Kazakhstan). In: W. Haeberli and D. Brandova (Editors), 8th International Conference on Permafrost, Extended Abstracts. University of Zurich, Zürich, pp. 101–102.
212. Margulis, S. A., Giroto, M., Cortés, G., & Durand, M. (2015). A particle batch smoother approach to snow water equivalent estimation. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1752–1772. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0177.1>
213. Marty, C. (2008). Regime shift of snow days in Switzerland: *Geophysical Research Letters*, v. 35, p. L12501.
214. Marzeion, B. et al. Partitioning the uncertainty of ensemble projections of global glacier mass change. *Earths Future* 8, e2019EF001470 (2020).
215. Marzeion, B., Jarosch, A. H. & Hofer, M. (2012). Past and future sea-level change from

- the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere* 6, 1295–1322.
216. Mashtayeva, S., Dai, L., Che, T., Sagintayev, Z., Sadvakasova, S., Kussainova, M., Alimbayeva, D., & Akynbekkyzy, M. (2016). Spatial and temporal variability of snow depth derived from passive microwave remote sensing data in Kazakhstan. *Journal of Meteorological Research*, 30(6), 1033–1043. <https://doi.org/10.1007/s13351-016-5109-z>
217. Maussion, F., Scherer, D., Mölg, T., Collier, E., Curio, J., & Finkelnburg, R. (2014). Precipitation seasonality and variability over the Tibetan Plateau as resolved by the High Asia Reanalysis. *Journal of Climate*, 27(5), 1910–1927. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00282.1>
218. Meinshausen, M. et al. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.* 13, 3571–3605.
219. Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., et al. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climat. Change* 109, 213–241. doi: 10.1007/s10584-011-0156-z
220. Mergili, M., Kopf, C., Müllebner, B., & Schneider, J. F. (2012). Changes of the cryosphere and related geohazards in the high-mountain areas of Tajikistan and Austria: a comparison. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94(1), 79–96. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2011.00450.x>
221. Micklin, P. (1988). Dessication of the Aral Sea: A water management disaster in the Soviet Union. *Science*, 241: 1170–1176.
222. Micklin, P. (2010). The past, present, and future Aral Sea. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 15(3), 193–213.
223. Middleton, N. (2002). The Aral Sea. *Physical Geography of Northern Eurasia*, pp. 497–510.
224. Miles, E., McCarthy, M., Dehecq, A., Kneib, M., Fugger, S., & Pellicciotti, F. (2021). Health and sustainability of glaciers in High Mountain Asia. *Nature communications*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23073-4>
225. Millan, R., Mouginot, J., Rabatel, A. & Morlighem, M. (2022). Ice velocity and thickness of the world's glaciers. *Nat. Geosci.* 15, 124–129.
226. Moelg, N., Bolch, T., Rastner, P., Strozzi, T., Paul, F. (2018). A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from Landsat data: distribution of debris cover and mapping challenges, *Earth Syst. Sci. Data* 10 (2018) 1807–1827, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1807-2018>
227. Mölg, T., Maussion, F., & Scherer, D. (2014). Mid-latitude westerlies as a driver of glacier variability in monsoonal High Asia. *Nature Climate Change*, 4(1), 68–73. <https://doi.org/10.1038/nclimate2055>
228. Molotch, N. (2010) Reconstructing snow water equivalent in mountainous regions using remotely sensed data and distributed snowmelt models, *Geophysical Research Abstracts*, 12, 13 763. <https://doi.org/10.1002/hyp.7206>
229. Munia, H., Guillaume, J. H. A., Mirumachi, N., Porkka, M., Wada, Y., Kummu, M. (2016). Water stress in global transboundary river basins: significance of upstream water use on downstream stress. *Environmental Research Letters*, 11(1), 014002.
230. Murzakulova, A., Schmidt-Vogt, D., Balla, D., Darr, D., Hamidov, A., Kasymov, U., Hamidov, A., Orazgaliyev, S. (2019). Water for agriculture and other economic sectors. In *The Aral Sea Basin* (pp. 86–99). Routledge.
231. Naegeli, K., Huss, M., & Hoelzle, M. (2019). Change detection of bare-ice albedo in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 13(1), 397–412. <https://doi.org/10.5194/tc-13-397-2019>
232. Narama, C., Käab, A., Duishonakunov, M., & Abdrakhmatov, K. (2010). Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~ 1970), Landsat (~ 2000), and ALOS (~ 2007) satellite data. *Global and Planetary Change*, 71(1–2), 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.08.002>
233. Narama, C., Severskiy, I., and Yegorov, A. (2009). Current state of glacier changes, glacial lakes, and outburst floods in the Ile Ala-Tau and Kungöy Ala-Too ranges, northern Tien Shan Mountains. *Chiriga Kronshud.* 84, 22–32. <https://doi.org/10.7886/hgs.84.22>
234. Narama, C., Shimamura, Y., Nakayama, D., & Abdrakhmatov, K. (2006). Recent changes of glacier coverage in the western Terskey-Atatoo range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat. *Annals of Glaciology*, 43, 223–229. <https://doi.org/10.3189/172756406781812195>
235. Notarnicola, C. Observing Snow Cover and Water Resource Changes in the High Mountain Asia Region in Comparison with Global Mountain

- Trends over 2000–2018. *Remote Sens.* 2020, 12, 3913. <https://doi.org/10.3390/rs12233913>
236. Nurakynov, S., Kaldybayev, A., Zulpukharov, K., Sydyk, N., Merekeyev, A., Chepashev, D., Nyssanbayeva, A., Issanova, G., & Fang, G. (2023). Accelerated Glacier Area Loss in the Zhetysu (Dzhungar) Alatau Range (Tien Shan) for the Period of 1956–2016. *Remote Sensing*, 15(8), 2133. <https://doi.org/10.3390/rs15082133>
237. Nüsser, M. (2017). Socio-hydrology: A New Perspective on Mountain Waterscapes at the Nexus of Natural and Social Processes. *Mountain Research and Development*, 37(4), 518–520. doi:10.1659/mrd-journal-d-17-00101.1
238. Nüsser, M., Dame, J., Parveen, S., Kraus, B., Baghel, R., Schmidt, S. (2019). Cryosphere-fed irrigation networks in the northwestern Himalaya: Precarious livelihoods and adaptation strategies under the impact of climate change. *Mountain Research and Development*. 39(2): p. R1–R11. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00072.1>
239. O'Hara, S., Hannan, T., Genina, M. (2008). Assessing access to safe water and monitoring progress on MDG7 target 10 (access to safe water and basic sanitation): Lessons from Kazakhstan. *Water Policy* 10 (1), 1–24.
240. Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H. H., Dashtseren, A., Delaloye R, Elberling, B., Etmüller, B. and Kholodov, A. (2019) Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale *Earth-Sci. Rev.* 193, 299–316
241. Oerlemans, J. (2001). *Glaciers and Climate Change*.
242. Oerlemans, J, Reichert, B. K. (2000). Relating glacier mass balance to meteorological data by using a seasonal sensitivity characteristic. *Journal of Glaciology*, 46(152), 1–6. doi:10.3189/172756500781833269
243. Orlovsky, N. (1994). *Climate of Turkmenistan. Biogeography and Ecology of Turkmenistan. Monographiae Biologicae*, vol. 72. Springer, Dordrecht.
244. Orlovsky, N., & Orlovsky, L. (2002, June). Water resources of Turkmenistan: use and conservation. In workshop on water, climate, and development issues in the Amu Darya basin, Philadelphia, USA.
245. Orlovsky, N., & Orlovsky, L. (2014). Water resources of Turkmenistan: Use and conservation. The Jacob Blaustein Institute for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev.
246. Ozturk, T., Altinsoy, H., Türkeş, M., & Kurnaz, M. (2012). Simulation of temperature and precipitation climatology for the Central Asia CORDEX domain using RegCM 4.0. *Climate Research*, 52, 63–76. Retrieved July 23, 2021, from <http://www.jstor.org/stable/24875011>
247. Ozturk, T., Turp, M. T., Türkeş, M. & Kurnaz, M. L. 2017. Projected changes in temperature and precipitation climatology of Central Asia CORDEX Region 8 by using RegCM4.3.5. *Atmospheric Research*, 183, 296–307.
248. Pereira-Cardenal, S. J., Riegels, N. D., Berry, P. A. M., Smith, R. G., Yakovlev, A., Siegfried, T. U., and Bauer-Gottwein, P. (2011) Real-time remote sensing driven river basin modeling using radar altimetry, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 241–254, <https://doi.org/10.5194/hess-15-241-2011>
249. Pertziger, F. (1996). *Abramov Glacier Data Reference Book: Climate, Runoff, Mass Balance*. Tashkent: Central Asian Hydrometeorological Institute.
250. Peters, J., Bolch, T., Gafurov, A., and Prectel, N. (2015). Snow cover distribution in the Aksu catchment (Central Tien Shan) 1986–2013 based on AVHRR and MODIS data: *IEEE Journal of Selected Topics of Applied Earth Observation*, v. 8, no. 11, p 5361–5375.
251. Petrov, M. (1976). *Deserts of the World*. New York: John Wiley & Sons.
252. Petrov, M. A., Sabitov, T. Y., Tomashevskaya, I. G., Glazirin, G. E., Chernomorets, S. S., Savernyuk, E. A., Tutubalina, O. V., Petrakov, D. A., Sokolov, L. S., Dokukin, M. D., Mountrakis, G., Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M. (2017). Glacial lake inventory and lake outburst potential in Uzbekistan: *Science of the Total Environment*, v. 592, pp. 228–242.
253. Pohl, E., Gloaguen, R., Andermann, C., & Knoche, M. (2017). Glacier melt buffers river runoff in the Pamir Mountains. *Water Resources Research*, 53(3), 2467–2489.
254. Pohl, E., Knoche M., Gloaguen, R., Andermann, C., and Krause, P. (2015). Sensitivity analysis and implications for surface processes from a hydrological modelling approach in the Gunt catchment, high Pamir Mountains. *Earth Surface Dynamics*, 3, 333–362, doi:10.5194/esurf-3-333-2015
255. Pritchard, H. D. (2019). Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress.

- Nature, 569(7758), 649–654. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1240-1>
256. Qibing Zhang & Shichang Kang 2017. Glacier snowline altitude variations in the Pamirs, Tajikistan, 1998–2013: insights from remote sensing images, *Remote Sensing Letters*, 8:12, 1220–1229, DOI: 10.1080/2150704X.2017.1375611
257. Radchenko, I., Dervede, Y., Mannig, B., Frede, H.-G. & Breuer, L. 2017. Climate change impacts on runoff in the Ferghana Valley (Central Asia). *Water Resources*, 44, 707–730.
258. Radić, V., and Hock, R. (2011). Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise. *Nat. Geosci.* 4, 91–94. doi:10.1038/ngeo1052
259. Radić, V., Bliss, A., Beedlow, A. C., Hock, R., Miles, E., & Cogley, J. G. (2014). Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models. *Climate Dynamics*, 42, 37–58.
260. Radić, V., Bliss, A., Beedlow, A. C., Hock, R., Miles, E., and Cogley, J. G. (2014). Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models. *Clim. Dyn.* 42, 37–58. doi: 10.1007/s00382-013-1719-7
261. Rastner, P., Prinz, R., Notarnicola, C., Nicholson, L., Sailer, R., Schwaizer, G., & Paul, F. (2019). On the automated mapping of snow cover on glaciers and calculation of snow line altitudes from multi-temporal landsat data. *Remote Sensing*, 11(12), 1410. <https://doi.org/10.3390/rs11121410>
262. Ravanel, L., Magnin, F. and Deline, P: Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. (2017). *Science of the Total Environment*, 609, 132–143, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.055>
263. Reyer, C. P., Otto, I. M., Adams, S., Albrecht, T., Baarsch, F., Carlsburg, M., Coumou, D., Eden, A., Ludi, E., Marcus R., Mengel, M., Mosello, B., Robinson, A., Schleussner, C. F., Serdeczny, O., Stagl, J. (2015). Climate change impacts in Central Asia and their implications for development. *Reg. Environ. Change*, 17, pp. 1639–1650. DOI: 10.1007/s10113-015-0893-z
264. RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory — A Dataset of Global Glacier Outlines, v. 6 (NSIDC, 2017); <https://doi.org/10.7265/4m1f-gd79>
265. Riahi, K., et al. (2017). Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) for the 21st Century: Towards a Common Approach. *Global Environmental Change*, 42, 148–153.
266. Rogger, M., Chirico, G. B., Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E., Stadler, P., & Blöschl, G. (2017). Impact of mountain permafrost on flow path and runoff response in a high alpine catchment. *Water Resources Research*, 53(2), 1288–1308. doi:10.1002/2016wr019341
267. Rounce, D. R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier E., Brinkerhoff, A., Compagno, L., Copland, L., Farinotti, D., Menounos, B., and McNabb, R. W. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science*, 379, 78–83, <https://doi.org/10.1126/science.abo1324>
268. Rounce, D. et al. Global glacier change in the 21st century: every increase in temperature matters. *Science* 379, 78– 83 (2023).
269. Rounce, D. R., Hock, R., & Shean, D. E. (2020). Glacier mass change in High Mountain Asia through 2100 using the open-source Python glacier evolution model (PyGEM). *Frontiers in Earth Science*, 7, 331. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00331>
270. Russo, E., Kirchner, I., Pfahl, S., Schaap, M., & Cubasch, U. (2019). Sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM 5.0 over the CORDEX Central Asia Domain. *Geoscientific Model Development*, 12(12), 5229–5249. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-5229-2019>
271. Saiko, T. and Zonn, I. (2000). Irrigation expansion and dynamics of desertification in the CircumAral region of Central Asia. *Appl Geogr* 20(4):349–367
272. Sakai, A., & Fujita, K. (2017). Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia. *Scientific reports*, 7(1), 13717.
273. Saks, T., Pohl, E., Machguth, H., Dehecq, A., Barandun, M., Kenzhebaev, R., Kalashnikova, O., Hoelzle, M. (2022). Glacier Runoff Variation Since 1981 in the Upper Naryn River Catchments, Central Tien Shan. *Front. Environ. Sci., Sec. Freshwater Science*, v-9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.780466>
274. Salnikov, V., Talanov, Y., Polyakova, S., Assylbekova, A., Kauazov, A., Bultekov, N., Musralinova, G., Kissebayev, D., & Beldeubayev, Y. (2023). An Assessment of the Present Trends in Temperature and Precipitation

- Extremes in Kazakhstan. *Climate*, 11(2), 33. <https://doi.org/10.3390/cli11020033>
275. Salnikov, V., Turulina, G., Polyakova, S., Petrova, Y., & Skakova, A. (2015). Climate change in Kazakhstan during the past 70 years. *Quaternary International*, 358, 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.09.008>
276. Sara, J., Proskuryakova, T. (2022). Central Asia: at the confluence of global water action and climate resilience Dushanbe conference to emphasize role of water in sustainable development — The World Bank Blog. <http://surl.li/nkdkki>
277. Schaner, N., Voisin, N., Nijssen, B., & Lettenmaier, D. P. (2012). The contribution of glacier melt to streamflow. *Environmental Research Letters*, 7(3), 034029. doi:10.1088/1748-9326/7/3/034029
278. Scherler, D., Bookhagen, B., & Strecker, M. R. (2011). Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *Nature Geoscience*, 4(3), 156–159. <https://doi.org/10.1038/ngeo1068>
279. Schiemann, R., Glazirina, M. G. & Schär, C. (2007). On the relationship between the Indian summer monsoon and river flow in the Aral Sea basin. *Geophysical Research Letters*, 34.
280. Schiemann, R., Lüthi, D. & Schär, C. (2009). Seasonality and Interannual Variability of the Westerly Jet in the Tibetan Plateau Region. *Journal of Climate*, 22, 2940–2957.
281. Schiemann, R., Lüthi, D., Vidale, P. L., and Schär, C. (2008). The precipitation climate of Central Asia — intercomparison of observational and numerical data sources in a remote semiarid region, *Int. J. Climatol.*, 28, 295–314.
282. Schmale, J., et al., Modulation of snow reflectance and snowmelt from Central Asian glaciers by anthropogenic black carbon. (2017). *Science Reports*, 7: p. 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep4050>
283. Schöne, T., Zech, C., Unger-Shayesteh, K., Rudenko, V., Thoss, H., Wetzels, H. U., ... & Zubovich, A. (2013). A new permanent multi-parameter monitoring network in Central Asian high mountains—from measurements to data bases. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2(1), 97–111.
284. Schöne, T., Zubovich, A., Zech, C., Illigner, J., Sharshabaev, A., Mandychev, D., Shakirov, A. N., Haghighi, M. H., Gerlitz, L., Gafurov, A., Moldobekov, B., & Lauterjung, J. (2019). In Situ and Remote Water Monitoring in Central Asia — The Central Asian Water (CAWa) Network. *Current Trends in Landscape Research*, 599–610.
285. Schrader, F., Bekchanov, M., Laldjebaev, M., Kamolidinov, A. (2019). Hydropower. In: *The Aral Sea Basin: Water for Sustainable Development in Central Asia*, S. Xenarios, et al., Editors. 2019, Routledge Publisher: London and New York. p. 52–66.
286. SDC, 2012, Swiss Cooperation Strategy Central Asia 2012–2015: Federal Department of Foreign Affairs FDFASwiss Agency for Development and Cooperation SDC Federal Department of Economic Affairs FDEAState Secretariat for Economic Affairs SECO.
287. Semakova, E., & Bühler, Y. (2017). TerraSAR-X/TanDEM-X data for natural hazards research in mountainous regions of Uzbekistan. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(3), 036024–036024.
288. Semakova, E., & Semakov, D. (2022). Changes in Glaciers in the Pskem River basin, Uzbekistan: 1942–2020. *International Journal of Geoinformatics*, 18(1), 43–51.
289. Semakova, E., Gunasekara, K., & Semakov, D. (2016). Identification of the glaciers and mountain naturally dammed lakes in the Pskem, the Kashkadarya and the Surhandarya River basins, Uzbekistan, using ALOS satellite data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1081–1098.
290. Serquet, G., Marty, C., and Rebetz, M. (2013). Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation day ratio: Theoretical and Applied Climatology, v. 114, pp. 437–444.
291. Severskiy, E., (2017). Permafrost response to climate change in the Northern Tien Shan. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 9(4): 398–403. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2017.00398
292. Severskiy, I., Vilesov, E., Armstrong, R., Kokarev, A., Kogutenko, L., Usmanova, Z., Morozova, V., & Raup, B. (2016). Changes in glaciation of the Balkhash-Alakol basin, central Asia, over recent decades. *Annals of Glaciology*, 57(71), 382–394. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A575>
293. Shahgedanova, M., Afzal, M., Hagg, W., Kapitsa, V., Kasatkin, N., Mayr, E., Rybak, O., Saidaliyeva, Z., Severskiy, I., Usmanova, Z., Wade, A., Yaitskaya, N., & Zhumabayev, D. (2020). Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central

- Asia. *Water*, 12(3), 627. <https://doi.org/10.3390/w12030627>
294. Shahgedanova, M., Afzal, M., Severskiy, I., Usmanova, Z., Saidaliyeva, Z., Kapitsa, V., Kasatkin, N., & Dolgikh, S. (2018). Changes in the mountain river discharge in the northern Tien Shan since the mid-20th Century: Results from the analysis of a homogeneous daily streamflow data set from seven catchments. *Journal of Hydrology*, 564, 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.001>
295. Shean, D. E., Bhushan, S., Montesano, P., Rounce, D. R., Arendt, A., Osmanolu, B. (2020). A systematic, regional assessment of high mountain Asia glacier mass balance. *Frontiers in Earth Science*, 7, 363. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00363>
296. Siegfried, T., Bernauer, T., Guennet, R., Sellars, S., Robertson, A. W., Mankin, J., Bauer-Gottwein, P., Yakovlev, A. (2012). Will climate change exacerbate water stress in Central Asia? *Climatic Change*, 112, 881–899.
297. Siegfried, T., Mujahid, A. U. H., Marti, B., Molnar, P., Karger, D. N., & Yakovlev, A. (2024). Unveiling the Future Water Pulse of Central Asia: A Comprehensive 21st Century Hydrological Forecast from Stochastic Water Balance Modeling. *Climatic Change*, 177(9), 141.
298. Sitara, P., Winiger, M., Schmidt, S., Nüsser, M. (2015). Irrigation in Upper Hunza: Evolution of socio-hydrological interactions in the Karakoram, northern Pakistan. *Erdkunde*. 69. 69–85. DOI: 10.3112/erdkunde.2015.01.05
299. Smith, T. and Bookhagen, B.: Changes in seasonal snow water equivalent distribution in High Mountain Asia (1987 to 2009). (2018). *Sci. Adv.*, 4, e1701550, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701550>
300. Sommer, R., Glazirina, M., Yuldashev, T., Otarov, A., Ibraeva, M., Martynova, L., Bekenov, M., Kholov, B., Ibragimov, N., Kobilov, R., Karaev, S., Sulstonov, M., Khasanova, F., Esanbekov, M., Mavlyanov, D., Isaev, S., Abdurahimov, S., Ikramov, R., Shezdyukova, L. & De Pauw, E. 2013. Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 178, 78–99.
301. Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., & Beniston, M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2(10), 725–731. doi:10.1038/nclimate1592
302. Sorg, A., Huss, M., Rohrer, M. & Stoffel, M. (2014). The days of plenty might soon be over in glacierized Central Asian catchments. *Environmental Research Letters*, 9, 104018.
303. Sorg, A., Käab, A., Roesch, A., Bigler, C., & Stoffel, M. (2015). Contrasting responses of Central Asian rock glaciers to global warming. *Scientific Reports*, 5(1). doi:10.1038/srep08228
304. Stanchin, I., Lerman, Z. (2007). Water in Turkmenistan (No. 888-2016-65088).
305. Stoffel, M. and Huggel, C. (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments: Progress in Physical Geography, v. 36, pp. 421–439.
306. Streletskiy, D., Noetzli, J., Smith, S. L., Vieira, G., Schoeneich, P., Hrbacek, F. and A.M. Irrgang (2021): Measurement Standards and Monitoring Guidelines for the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). 2021. DOI: 10.5281/zenodo.6075468
307. Toderich, K., Tsukatani, T., Abdusamatov, M. (2004). Water resources assessment, irrigation and agricultural developments in Tajikistan. KIER Discussion Paper, 585.
308. Tomaszewska, M. A., Henebry, G. M. (2018). Changing snow seasonality in the highlands of Kyrgyzstan. *Environmental Research Letters*. — T. 13. — №. 6. — C. 065006.
309. UNDP. (2011). The glaciers of Central Asia: a disappearing resource. United Nations Development Programme, UNEP/DEWA/GRID-Europe
310. Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Farinotti, D., Gafurov, A., Duethmann, D., Mandychev, A., & Merz, B. (2013). What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review. *Global and Planetary Change*, 110, 4–25. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.00>
311. Varis, O. (2014). Resources: Curb vast water use in Central Asia. *Nature* 514, 27–29.
312. Walter, F., Amann, F., Kos, A., Kenner, R., Phillips, M., de Preux, A., Huss, M., Tognacca, C., Clinton, J., Diehl, T., Bonanomi, Y. (2019). Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology*, 106933. doi:10.1016/j.geomorph.2019.106933.
313. Wang, Q., Yi, S., Chang, L., & Sun, W. (2017). Large-scale seasonal changes in glacier thickness across High Mountain Asia. *Geophysical Research Letters*, 44(20), 10427–10435. <https://doi.org/10.1002/2017gl075300>
314. Wang, R., Liu, S., Shangguan, D., Radić, V., & Zhang, Y. (2019). Spatial heterogeneity in glacier mass-balance sensitivity across High

- Mountain Asia. *Water*, 11(4), 776. <https://doi.org/10.3390/w11040776>
315. Wang, X., Ding, Y., Liu, S., Jiang, L., Wu, K., Jiang, Z., & Guo, W. (2013). Changes of glacial lakes and implications in Tian Shan, central Asia, based on remote sensing data from 1990 to 2010. *Environmental Research Letters*, 8(4), 044052. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044052>
316. Wendt, A., Mayer, C., Lambrecht, A., and Floricioiu, D. (2017). A Glacier Surge of Bivachny Glacier, Pamir Mountains, Observed by a Time Series of High-Resolution Digital Elevation Models and Glacier Velocities. *Remote Sensing* 9, no. 4: 388. <https://doi.org/10.3390/rs9040388>
317. WGMS, 2022. Fluctuations of Glaciers Database. <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2022-09>
318. WGMS, 2023. Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020–2021). Zemp, M., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Welty, E. Z., Dussaillant, I. and Bannwart, J., (eds.), ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 134 pp., publication based on database version: doi:10.5904/wgms-fog-2023-09
319. WGMS, ed. Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017). Global Glacier Change Bulletin, ed. M. Zemp, et al. Vol. 3. 2020, ISC(WDS)/IUGG(IACS)/ UNEP/ UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service: Zürich. 274.
320. White, C. J., Tanton, T. W. & Rycroft, D. W. (2014). The Impact of Climate Change on the Water Resources of the Amu Darya Basin in Central Asia. *Water Resources Management*, 28, 5267–5281.
321. Wicky, J., & Hauck, C. (2017). Numerical modelling of convective heat transport by air flow in permafrost talus slopes. *The Cryosphere*, 11(3), 1311–1325. doi:10.5194/tc-11-1311-2017
322. Winsvold, S. H., Kääh, A., Nuth, C., Andreassen, L. M., Van Pelt, W. J., & Schellenberger, T. (2018). Using SAR satellite data time series for regional glacier mapping. *The Cryosphere*, 12(3), 867–890. <https://doi.org/10.5194/tc-12-867-2018>
323. WMO, 2019, Call to action: Avoiding the impending crisis in mountain weather, climate, snow, ice and water: Pathways to a Sustainable Global Future: World Meteorological Organization.
324. World Glacier Monitoring Service. Fluctuations of Glaciers Database (WGMS, 2022); <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2022-09>.
325. Worni, R., Huggel, C., & Stoffel, M. (2013). Glacial lakes in the Indian Himalayas — From an area-wide glacial lake inventory to on-site and modeling based risk assessment of critical glacial lakes. *Science of The Total Environment*, 468–469, S71–S84. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.11.043.
326. Xenarios, S., Gafurov, A., Schmidt-Vogt, D., Sehring, J., Manandhar, S., Hergarten, C., Shigaeva, J., & Foggin, M. (2019). Climate change and adaptation of mountain societies in Central Asia: uncertainties, knowledge gaps, and data constraints. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1339–1352. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1384-9>
327. Xenarios, S., Schmidt-Vogt, D., Qadir, M., Janusz-Pawletta, B., Abdullaev, I., & Smakhtin, V. (2019). The Aral Sea Basin: Water for Sustainable Development in Central Asia (Introduction). In *The Aral Sea Basin: Water for Sustainable Development in Central Asia* (p. 1). Routledge.
328. Young, S. S. (2023). Global and Regional Snow Cover Decline: 2000–2022. *Climate*, 11(8), 162. <https://doi.org/10.3390/cli11080162>
329. Zandler, H., Haag, I., & Samimi, C. (2019). Evaluation needs and temporal performance differences of gridded precipitation products in peripheral mountain regions. *Scientific Reports*, 9, 15118. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51666-z>
330. Zemp, M., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Welty, E. Z., Dussaillant, I., & Bannwart, J. (2023). WGMS 2023. Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020–2021).
331. Zhang, H., Ouyang, Z., Zheng, H., Wang, X. (2009). Recent climate trends on the northern slopes of the Tianshan mountains, Xinjiang, China. *J Mt Sci* 6:255–265. doi:10.1007/s11629-009-0236-y
332. Zhang, T. P. (1987). *Precipitation in Xirijian Beijing*. Beijing Press, 400 pp. (in Chinese).
333. Zheng, G., Allen, S. K., Bao, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Huss, M., Zhang, G., Li, J., Yuan, Y., Jiang, L., Yu, T., Chen, W., & Stoffel, M. (2021). Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation.

- Nature Climate Change. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01028-3>
334. Zhou, H., Aizen, E., & Aizen, V. (2017). Seasonal snow cover regime and historical change in Central Asia from 1986 to 2008. *Global and Planetary Change*, 148, 192–216. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.011>
335. Zonn, I.S. (2012). Water Resources of Turkmenistan. The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan. *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 28. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_2012_205
336. 8-е национальное сообщение и 5-й двухгодичный доклад Республики Казахстан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. (2022).
337. Абдырасуова Н. А., Подрезов О. А., Павлова, И. А., Стрижанцева О. М., Сулейманова Д. К. (2011). Изменение климата Кыргызстана. Кыргызстан: Унисон.
338. Аламанов С., Лелевкин В., Подрезов О., Подрезов А. (2006). Изменение климата и водные проблемы в Центральной Азии. Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП) и Всемирный фонд дикой природы (WWF), Москва–Бишкек.
339. Аубекеров Б., Чалихжан Е. и Закупова С. (1989). Изменения климата и палеогеографических условий Центрального Казахстана в позднеледниковье и голоцене. Палеоклиматы позднеледниковья и голоцена. Москва: Наука, с. 98-102.
340. Бектурганов З., Тусупова К., Берндтссон Р., Шарапатова Н., Арынгазин К., Жанасова М. (2016). Проблемы здоровья, связанные с водой, в Центральной Азии — обзор. // *Вода*, вып. 8, № 6, с 219.
341. Бюллетень «Основные показатели работы транспорта Республики Казахстан». (2023).
342. Варущенко С., Варущенко А. и Клиге Р. (1987). Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоёмов в палеовремени. Москва: Наука.
343. Величко А., Климанов В. и Беляев А. (1987). Каспий и Волга 5,5 и 125 тысяч лет назад. // *Природа*, № 3, с. 60–66.
344. Вилесов Е. Н. (2007). Изменение климата высокогорья Илейского Алатау в условиях глобального потепления. // *Гидрометеорология и экология*, № 1, с. 29–38.
345. Вилесов Е. Н. (2016). Динамика и современное состояние оледенения гор Казахстана. Алматы: Қазақ университеті.
346. Вилесов Е. Н., Федулов И. Я. (1968). Ледник Корженевского в Заилийском Алатау. // *Гидрологический режим ледников Казахстана*, вып. 7, с. 95–103.
347. Вилесов Е. Н., Уваров В. Н. (1997). Колебания горных ледников как индикатор изменения климата. // *Гидрометеорология и экология*, № 3, с. 165–175.
348. Вилесов Е. Н., Северский И. В., Морозова В. И. (2014). Динамика оледенения Казахстанского Алтая за 60 лет. // *Лёд и снег*, вып. 126, № 2, с. 14–21. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-14-21>
349. Вилесов Е. Н. (2018). Изменение размеров и состояния ледников Казахстана за 60 лет (1955–2015 гг.). // *Лёд и снег*, вып. 58, № 2, с. 159–170. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-159-170>
350. Виноградов О. Н., Кренке А. Н., Огановский П. Н. (1966). Руководство по составлению каталога ледников СССР. Ленинград: Гидрометеоиздат.
351. Водный кадастр Республики Казахстан. Раздел 1. «Поверхностные воды». Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Бассейны рек Тобол и Торгай; вып. 3, 108 с. (2021).
352. Глазырин Г. Е., Станишевский А. В., Чертанов С. П., Огудин В. Л. (1988) Народная гляциология Средней Азии.
353. Глазырин Г. Е. (2009). Сведения о системе гидрометеорологического мониторинга в Узбекистане. // Доклад на Международном семинаре «Оценка снежно-ледовых и водных ресурсов Азии». Алматы, Казахстан, 2006,

- т. 8: Кобленц, ЮНЕСКО-МГП и Национальный комитет по МГП/ПГВР Германии, с. 65–83.
354. Глазырин Г. Е. (1985). Распределение и режим горных ледников. Ленинград: Гидрометеоздат, 180 с.
355. Глазырин Г. Е., Таджибаева У. У. (2011). Изменение климата в высокогорье Средней Азии в конце XX века. // Лёд и снег, вып. 2, с. 12–15.
356. Горбунов А., Немов А. Е. (1978). К исследованию температур рыхлообломочных толщ высокогорного Тянь-Шаня. // Криогенные явления высокогорий. Москва: Наука, с. 92–99.
357. Горбунов А., Северский Э., Титков С. (1996). Геокриологические условия Тянь-Шаня и Памира. Якутск: ИМЗ СО РАН, с. 67–83.
358. Горбунов А. П. (1978) Мерзлотные исследования в высокогорных районах. // Арктические и альпийские исследования, вып. 10 № 2, с. 283–294.
359. Горбунов А. П. (1979). Каменные глетчеры Заилийского Алатау. // Криогенные явления Казахстана и Средней Азии, с. 5–34.
360. Горбунов А. П., Железняк М. Н., Северский Э. В. (2018). Оценка объёмов подземных льдов в горной системе Тянь-Шаня. Криосфера Земли, т. 22, № 5, с. 35–44.
361. Горбунов А. П., Сусликов В. Н., Сулержицкий Л. Д. (2000). К эволюции криолитозоны Каракульской котловины на Памире: плейстоцен и голоцен. // Криосфера Земли, т. 4, № 4, с. 41–48.
362. Горбунов А. П., Титков С. Н. (1989). Каменные глетчеры гор Средней Азии.
363. Гулахмадов А. А. (2022). Анализ климатических переменных в верховьях бассейна реки Амударья в Таджикистане. // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, № 1, с. 76–85.
364. Долгушин Л. Д. и Осипова Г. Б. (1975). Пульсации ледников и проблема их прогнозирования. // Известия АН СССР, № 104, с. 292–304.
365. Долуханов П. (1985). Аридная зона Старого Света в позднем плейстоцене и голоцене. // Известия Всесоюзного географического общества, т. 117, с. 16–23.
366. Достай Ж. Д., Алимкулов С. К., Сапарова А. А. (2012). Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. Т. 7. Ресурсы речного стока Казахстана. Кн. 2: Возобновляемые ресурсы поверхностных вод юга и юго-востока Казахстана.
367. Духовный В., Соколов В., Зиганшина Д. (2014). Интегрированное управление водными ресурсами в Центральной Азии: Проблемы управления большими трансграничными реками. Global Water Partnership (GWP).
368. Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана, 2021. (2022). Республиканское государственное предприятие «Казгидромет».
369. Ермолин Е. Д., Немов А. Е., Попов М. В. (1989). Мерзлотно-геотермическая характеристика золоторудного месторождения Кумтор.
370. Желтенкова Н. В., Гагарин В. Е., Кошурников А. В. и Набиев И. А. (2020). Режимные геокриологические наблюдения на высокогорных перевалах Тянь-Шаня. // Арктика и Антарктика, № 3, с. 25–43. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.3.33535>
371. Жумаева М. Б., Шодиев С. Р., Чембарисов Е. И. (2021). Оценка изменения некоторых характеристик климата Центральной Азии. // Обеспечение устойчивого развития в контексте географии, зелёной экономики, экологии и туризма, № 9.
372. Золотокрылин А. (2003). Климатическое опустынивание. Москва: Наука.
373. Идрисов Т. (2023) Изменение климата и водные ресурсы в Центральной Азии: растущая неопределённость. Центральноазиатское бюро аналитической журналистики. <https://cabar.asia/ru/izmenenie-klimata-i-vodnye-resursy-v-tsentralnoj-azii-rastushhaya-neopredelyonnost>
374. Канаев Л. А. (1966). Современное оледенение бассейна на р. Пскем. // Труды САРНИГМИ, вып. 27 (42), с. 35–46.
375. Карандаева Л. М. (2004). Оценка современного оледенения бассейна реки Пскем по данным ASTER TERRA. // Труды НИГМИ, вып. 3, с. 96–100.
376. Кауазов А. М., Тиллякарим Т. А., Сальников В. Г., и Полякова С. Е. (2023). Оценка изменений площади снежного покрова в Казахстане с 2000 по 2022 год. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса, т. 20, № 1, с. 298–305. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-298-305>
377. Каюмов А., Кабутов Х. К., Наврузшоев Х. Д. (2022). Динамика изменения оледенения бассейна реки Сарыгун в районе озера Каракуль. // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-мате-

- матических, химических, геологических и технических наук. № 3 (188), с. 165–173.
378. Каюмов А., Кабутов Х. К., Хельцле М., Сакс Т., Барандун М. (2023). Баланс массы ледника Восточный Зульмарт (№ 139) на 2018–2022 г. // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. № 1 (190), с. 94–102.
379. Каюмова А., Новикова В. (2014). Третье национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Душанбе, 167 с., с иллюстрациями и библиографией.
380. Кес А., Мамедов Э., Хондкярян С., Трофимов Г., Кременецкий К. (1993). Стратиграфия и палеогеография равнинных областей Средней Азии в позднем плейстоцене и голоцене. Развитие ландшафтов и климата Северной Евразии, с. 82–87.
381. Кислов Б. В. (1982). Формирование и режим фирно-ледяной толщи горного ледника (кандидатская диссертация). САРНИГМИ, Ташкент.
382. Кокарев А. Л., Капица В. П., Больш Т., Северский И. В., Касаткин Н. Е., Шахгеданова М., Усманова З. С. (2022). Результаты геодезических измерений баланса массы некоторых ледников Заилийского Алатау. // Лёд и снег, вып. 62, № 4: с. 527–538. <https://doi.org/10.31857/S2076673422040149>
383. Котляков В. М. (1975). Каталог ледников СССР. Гидрометеоиздат, т. 14, вып. 3, часть 17–18, 37 с.
384. Котляков В. М. (1980). Проблемы и результаты исследований горных ледников в Советском Союзе. // Публикация МАГН, № 126, с. 129–136.
385. Котляков В. М., Северский И. В. (2006). Ледники Центральной Азии: современное состояние, изменения, возможное влияние на водные ресурсы. // Северский И. В. (под ред.). Материалы международного семинара «Оценка снежно-ледовых и водных ресурсов Азии», Алматы, Казахстан, с. 21–55. ЮНЕСКО.
386. Котляков В. М., Осипова Г. Б., Цветков Д. Г. (2008) Космический мониторинг пульсирующих ледников Памира // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 4. с. 74–83. Также: *Annals of Glaciology*, 48, 125–134. doi:10.3189/172756408784700608
387. Кудышкин Т. В., Тарасов Ю. А. и Яковлев А. В. (2014). Изменения в оледенении речных бассейнов с преобладанием малых ледников во второй половине XX – начале XXI века // Вопросы географии и геоэкологии. Алматы; с. 45–54.
388. Куранбоева З., Усаров З. (2023). Оценка изменений температуры воздуха и осадков современного климатического периода в горных районах Узбекистана по сравнению с базовым климатическим периодом. // Водные ресурсы аридных регионов в условиях изменения климата: проблемы и их решения. Материалы международной научно-практической конференции. Ташкент, 20 октября 2023 г., с. 82–88 (на узб. яз.).
389. Куранбоева З., Усаров З., Бабушкин О. Л., Мамаджанова Г. А. (2022). Долгосрочные изменения нормы температуры воздуха и осадков в Узбекистане в условиях глобального потепления. // Гидрометеорологические исследования в условиях изменения климата: проблемы и решения. Материалы международной научно-практической конференции. Ташкент, 3–4 июня 2022 г., с. 64–68 (на узб. яз.).
390. Кузьмиченок В. (2006). Мониторинг водных и снежно-ледовых ресурсов Кыргызстана. // Материалы международного семинара «Оценка снежно-ледовых и водных ресурсов Азии». Алматы, Казахстан. ЮНЕСКО-МГП и Национальный комитет по МГП/ПГВР Германии.
391. Макаревич К. Г. (1964). Организация гляциологических исследований на ледниках Талгарского ущелья в Заилийском Алатау. // Гляциологические исследования в период МГГ. Заилийский и Джунгарский Алатау, вып. 4, с. 54–70.
392. Макаревич К. Г., Федулов И. Я. (1968). Первые сведения о режиме ледника Корженевского. // Гидрологический режим ледников Казахстана, вып. 7, с. 104–115.
393. Макаревич К. Г., Федулов И. Я., Боровинский С. А. (1969). Электрическое зондирование ледника Корженевского, сток и баланс его массы. // Гляциологические исследования в Казахстане, вып. 8, с. 41–50.
394. Макаревич К. Г., Шабанов П. Ф. (1965). Движение льда в ледниках Талгара и его роль в речном стоке. // Гляциологические исследования в период МГГ. Заилийский и Джунгарский Алатау, вып. 5, с. 5–21.
395. Малышев А. Ф., Осмонбетов К. О., Осмонбетов Е. К. (1997). Состояние и особенности природных и антропогенных источников за-

- грязнения окружающей среды Кыргызстана. // Наука и новые технологии, № 4, Бишкек.
396. Маматканов Д., Баджанова Л., Романовский В. (2006). Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Монография, Бишкек.
397. Марченко С. С. (1999). Современное и ожидаемое в XXI веке изменение мерзлотноклиматических условий в северном Тянь-Шане. // Криосфера Земли, вып. 3, с. 12–21.
398. Марченко С. С., Горбунов А. П. (1997). Изменения многолетней мерзлоты в северном Тянь-Шане в течение голоцена. // Вечная мерзлота и перигляциальные процессы, т. 8, № 4, с. 427–435.
399. Марченко С. С., Горбунов А. П. и Романовский В. Е. (2007). Повышение температуры вечной мерзлоты в горах Тянь-Шаня, Средняя Азия. // Глобальные и планетарные изменения, т. 56, с. 311–327.
400. Махмадалиев Б., Каюмов А., Новиков В., Мустаева Н., Раджабов И. (2008). Второе национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Душанбе, 93 с.
401. Медеу А. Р., Алимкулов С. К., Турсунова А. А., Мырзахметов А. Б., Сапарова А. А., Баспакова Г. Р., Кулебаев К. М. (2020). Антропогенная нагрузка на водные ресурсы Казахстана. // Евразийский журнал биологических наук, т. 14, № 1.
402. Министерство энергетики и водных ресурсов Таджикистана. Использование водных ресурсов. https://www.mewr.tj/?page_id=576
403. Мирзохонова С. (2022). Климат Таджикистана в связи с глобальным потеплением. Веб-сайт Таджикского национального университета. <https://tnu.tj/index.php/ru/klimat-tadzhikistana-v-svjazi-s-globalnym-potepleniem/>
404. Муканова Б. А., Северский И. В., Капица В. П., Татькова М. Е., Кокарев А. Л., Шестерова И. Н. (2023, на рецензировании). Изменение оледенения северного склона Илейского Алатау за семидесятилетний период. // Вестник КазНУ, Серия географическая.
405. Национальная стратегия адаптации к изменению климата Республики Таджикистан на период до 2030 года (2019). <https://faolex.fao.org/docs/pdf/taj190980.pdf>
406. Наврузшоев Х. Д., Каюмов А. К. (2021). Изучение состояния оледенения верховья реки Вуждара дистанционным методом. // Душанбе. Криосфера, т. 1, № 3–4. С. 36–44.
407. Неронов В. (1997). Ландшафтные особенности вековых изменений увлажнённости в юго-восточном Туркменистане. // Аридные экосистемы, т. 3 № 6–7, с. 141–150.
408. Ниязов Дж. Б., Калашникова О. Ю., Мирзохонова С. О. (2019). Влияние климатических изменений на сток реки Гунт (приток реки Пяндж, бассейн реки Амударья, Таджикистан) за период 1940–2016 г. // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. № 3 (176), с. 84–91.
409. Ниязов Дж. Б., Саидов М. С., Саидов С. М. (2018). Лавиноопасность Лахшского района Республики Таджикистан. // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учётом глобального изменения климата «ГЕО-РИСК-2018»: материалы X Международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков, Москва, 23–24 октября 2018 г. В двух томах. Ответ. ред. Мавлянова Н. Г. Том I, с. 355–360. Москва: Российский университет дружбы народов, 2018.
410. Осмонбетова Д. К. (2021). Водные ресурсы и водообеспеченность Кыргызстана. Природообустройство, № 2, с. 117–124.
411. Пивень Е. Н. (2008). Климат ледниково-ниваляной зоны юго-восточного Казахстана, его современные изменения и возможное влияние на водные ресурсы региона. // Медеу А. Р. (под ред.), «Географические проблемы устойчивого развития: теория и практика». Международная научно-практическая конференция, посвящённая 70-летию Института географии АО «ЦНЗМО» Республики Казахстан. Институт географии. С. 112–123.
412. Пивень Е. Н. (2013). Климатические процессы в нивально-гляциальном поясе Заилийского Алатау и их воздействие на горное оледенение и речной сток. // Лёд и снег, вып. 53, № 2, с. 21–28. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-2-21-28>
413. Пиманкина Н., Такибаев Ж. (2021). Многолетняя изменчивость снежных ресурсов в Казахском Алтае. // Криосфера, 1-2 (1), с. 109–122.
414. Пиманкина Н. В., Такибаев Ж. Д. (2023). Динамика снежного покрова в бассейне р. Арыс в условиях изменения климата. // Вестник КазНУ. Серия географическая, т. 70, № 3,

- с. 72–84. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2023.v70.i3.06>
415. Подрезов О. А. (2014). Горная климатология и высотная климатическая зональность Кыргызстана. Бишкек: Изд-во КРСУ. 170 с.
416. Подрезов О., Диких Н., Бакиров К. (2001). Изменчивость климатических условий и оледенения Тянь-Шаня за последние 100 лет. // Вестник Киргизско-Российского славянского университета, т. 1, № 3, с. 33–40.
417. Профиль изменения климата: Таджикистан (2020). https://www.landuse-ca.org/wp-content/uploads/2019/04/2020_GIZ-Climate-Profile-Tajikistan_RU.pdf
418. Рязанцева З. А. (1965). Климат Киргизской ССР. Фрунзе: Илим, 1965. 220 с.
419. Савоскул О. С., Шевнина Е. В., Перцигер Ф. И., Василина Л. Ю., Бабулин В. Л., Данышин А. И., Матякубов Б., Муракаев Р. Р. (2003). Вода, климат, продовольствие и окружающая среда в бассейне реки Сырдарья.
420. Сафронова Е. (2009). «Водная проблема» в Центральной Азии и её влияние на имидж России и Китая в регионе. Китай в мировой и регионально политике. // История и современность, вып. 14, № 14, с. 94–114.
421. Северский И. В., Вилесов Е. Н., Макаревич Г. К., Диярова К. Ш. (2008). Гляциологические исследования в Казахстане: этапы развития, состояние, перспективы. // Медеу А. Р. (под ред.), «Географические проблемы устойчивого развития: теория и практика». Международная научно-практическая конференция, посвящённая 70-летию Института географии АО «ЦНЗМО» Республики Казахстан. Институт географии. С. 136–145.
422. Северский И. В., Кокарев А. Л., Пиманкина Н. В. (2012). Снежно-ледовые ресурсы Казахстана. // Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление (Медеу А. Р., под ред.), т. 6. Институт географии.
423. Северский И. В., Кокарев А. Л., Северский С. И., Токмагамбетов Т. Г., Шагарова Л. Б., Шестерова И. Н. (2006). Современные и прогнозные изменения оледенения в бассейне озера Балхаш (Северский И. В., под ред.). Институт географии.
424. Северский Э. В. (2019). Геотермический мониторинг криолитозоны Северного Тянь-Шаня. // Вопросы географии и геоэкологии, вып. 2, с. 87–96.
425. Северский Э. В., Оленченко В. В., Горбунов А. П. (2014). Влияние локальных факторов на распространение толщи мёрзлых пород перевала Жосалыкезень (Северный Тянь-Шань) // Криосфера Земли, т. XVIII, № 4, с. 13–22.
426. Служба водных ресурсов Кыргызской Республики (2022.09.09). Водные ресурсы Кыргызской Республики в объективе НИСИ КР. <http://surl.li/njzif>
427. Тарасов П. (1992). Эволюция климата и ландшафтов Северного и Центрального Казахстана. Докторская диссертация, Московский государственный университет, Москва, Россия.
428. Тарасов П., Узбб Т., Андреев А., Афанасьева Н., Березина Н., Безусько Л., Бляхарчук Т., Болиховская Н., Чеддади Р., Чернавская М., Чернова Г., Дорофеюк Н., Дирксен Н., Елина Г., Филимонова Л., Глебов Ф., Гийот Ж., Гунова В., Харрисон С., Джолли Д., Хомутова В., Квавадзе Е., Осипова И., Панова Н., Прентис И., Саарсе Л., Севастьянов Д., Волкова В. и Зерницкая В. (1998). Современные и среднеголоценовые биомы реконструированы по данным о пыльце и макрофоссилиях растений из бывшего Советского Союза и Монголии. // Биогеография, вып. 25, с. 1029–1053.
429. Терехов А. Г., Абаев Н. Н. (2023). Изменения в пространственном распределении снежных отложений в течение 2001–2022 гг. в Восточном Казахстане. // Гидрометеорология и экология, № 1, с. 15–22.
430. Токмагамбетов Г. А., Ерасов Н. В., Лебенков Е. Г., Сыргабаев М. (1977). Результаты сейсмического зондирования на леднике Малый Берельский. // Снежные лавины и ледники Казахстана, с. 139–143.
431. Токмагамбетов Т. Г. (2010). Оледенение Юго-Восточного Казахстана в условиях изменения климата. КазККА Хабаршысы, № 2, с. 248–254.
432. Тологонов Е. (2022). Водные ресурсы и вопросы водопользования государствами Центральной Азии. NISI.kg <https://nisi.kg/blog/23-Vodnyie-riesursy-i-voprosy-vodopolzovaniia-ghosudarstvami-Tsientralnoi-Azii.html>.
433. Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Ташкент, 2016.
434. Турсунова А., Медеу А., Алимкулов С., Сапарова А., и Баспакова Г. (2022). Водные ресур-

- сы Казахстана в условиях неопределённости. // Водное и земельное хозяйство, вып. 54.
435. Тюменев С. Д. (2008). Водные ресурсы и водообеспеченность территории Казахстана. Алматы: КазНТУ.
436. Усманова З. С. (2014). Оценка изменений ледников в бассейнах рек Шарын и Текес (казахстанская часть бассейна реки Иле) по данным космического мониторинга. // Вестник КазНУ, Серия географическая, т. 1, № 38, с. 72–80.
437. Усманова З. С., Капица В. П. (2015). Современное оледенение и гляциальные озёра бассейна реки Каратал. // Вестник КазНУ, Серия географическая, т. 1, № 40, с. 255–262.
438. Усманова З., Шахгеданова М., Северский И., Носенко Г., Капица В. (2016). Оценка изменения площади ледников в бассейне реки Текес, Центральный Тянь-Шань, Казахстан, за период с 1976 по 2013 гг., с использованием снимков Landsat и КН-9. // The Cryosphere Discussions [Препринт].
439. Усубалиев Р. А., Молдобеков Б. Д., Мандычев А. Н., Осмонов А. Т., Азисов Э., Кенжебаев Р., Эсенаман уулу М., Шабунин А. Г. (2021). Ледниковые системы Кыргызстана в условиях изменения климата. // «Управление водными ресурсами в Центральной Азии и Афганистане», под ред. Куленбекова З. Е., Асанова Б. Д. Springer Water.
440. Федулов И. Я., Шульц А. Г. (1989). Баланс массы ледника Корженевского. // Ледники, снежный покров и лавины горных районов Казахстана, с. 38–47.
441. Финаев А. Ф. (2013). Динамика оледенения некоторых районов Памиро-Алая. // Вопросы географии и геоэкологии, № 3, с. 32–42.
442. Фролов Д. М., Кошурников А. В., Гагарин В. Е., Набиев И. А., Додобоев Э. И. Изучение криосферы Зеравшанского и Гиссарского хребтов (Тянь-Шань). // Арктика и Антарктика. 2022. № 4, с. 1–10.
443. Хайдаров М. и Герлиц Л. (2019) «Изменчивость и изменение климата в Узбекистане — анализ на основе данных CHELSA с высоким разрешением». // Центральноазиатский журнал водных исследований, № 5, с. 1–19.
444. Хахимов П. (2019). Изменение климата в Афганистане, Кыргызстане и Таджикистане: тенденции и адаптационная политика, способствующая инновациям. Доклад № 55.
445. Харин Н., Татеиши Р., Грингоф И. (1998). Применение снимков NOAA AVHRR для оценки количества осадков и деградации земель в Центральной Азии. // Аридные экосистемы, т. 4, № 8, с. 25–34.
446. Царёв, Б. (2006). Оценка влияния изменения климата на максимальное снегонакопление в горах Центральной Азии. Труды НГМИ, т. 4, № 249, с. 15–32.
447. Черкасов П. А. (2004). Расчёт составляющих водно-ледникового баланса внутриконтинентальной ледниковой системы (под ред. Северского И. В. и Медеу А. Р.).
448. Четвёртое национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2022).
449. Чуб В. Е. (2007). Изменение климата и его влияние на гидрометеорологические процессы, агроклиматические и водные ресурсы Республики Узбекистан. Ташкент: Ворис нашриёт.
450. Шульц В. Л. (1965). Реки Средней Азии. Ленинград: Гидрометеоиздат.
451. Щетинников А. С. (1976). Ледники бассейна р. Пскем. Ленинград: Гидрометеоиздат.
452. Щетинников А. С., Подкопаева Л. Д. (без даты). Каталог ледников СССР. 1968–1969 гг. Ленинград: Гидрометеоиздат. Т. 14, части 1, 3.
453. Эшмент Б. (2011). Распределение водных ресурсов в Центральной Азии. Неразрешимая проблема?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Рисунок S1. Прогноз годового вклада талой воды ледников с 2000 по 2100 гг. для каждого водосборного бассейна и всех трёх сценариев выбросов

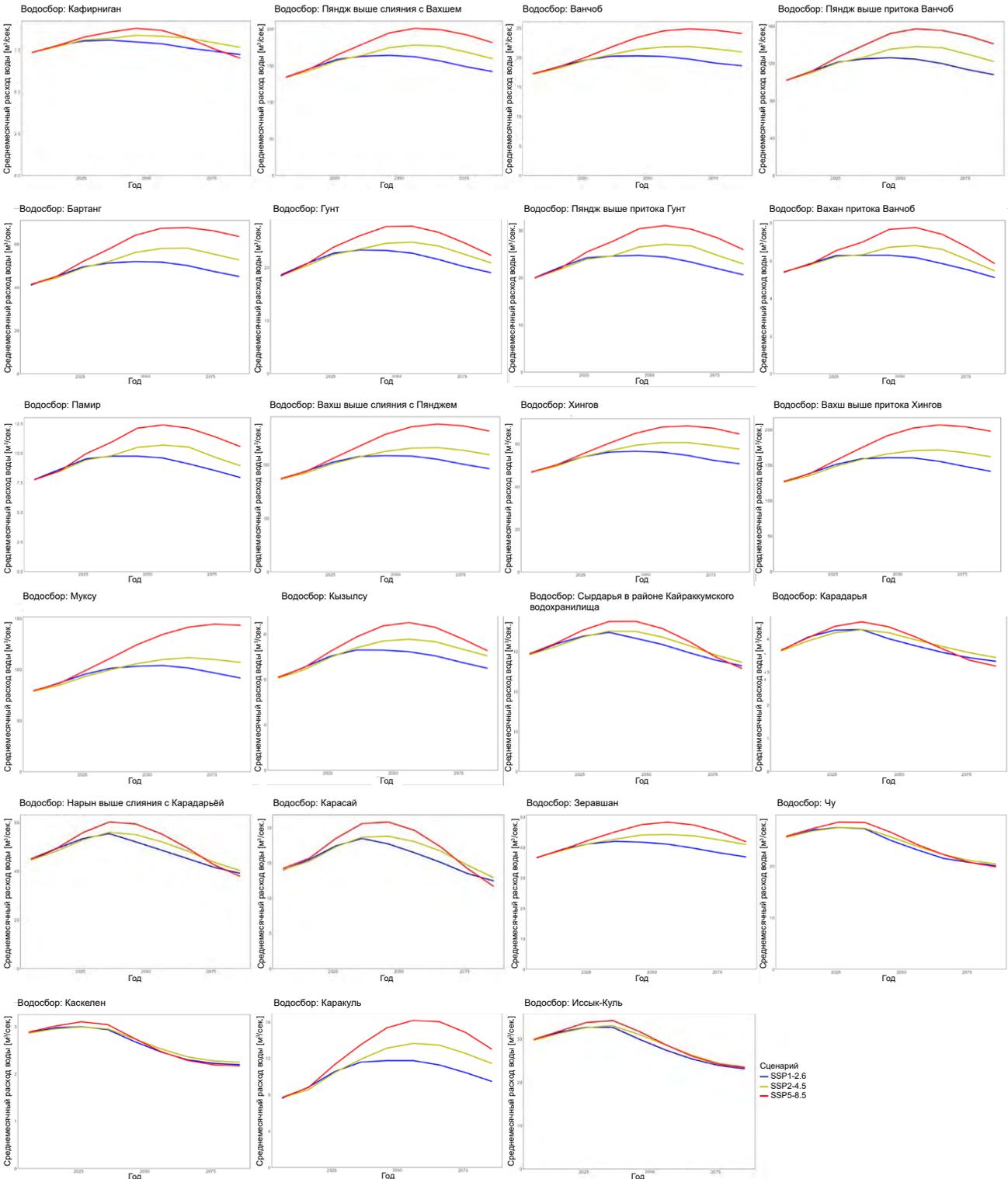


Рисунок S2. Прогноз сезонного вклада талой воды ледников на 2100 год для каждого водосборного бассейна и всех трёх сценариев выбросов

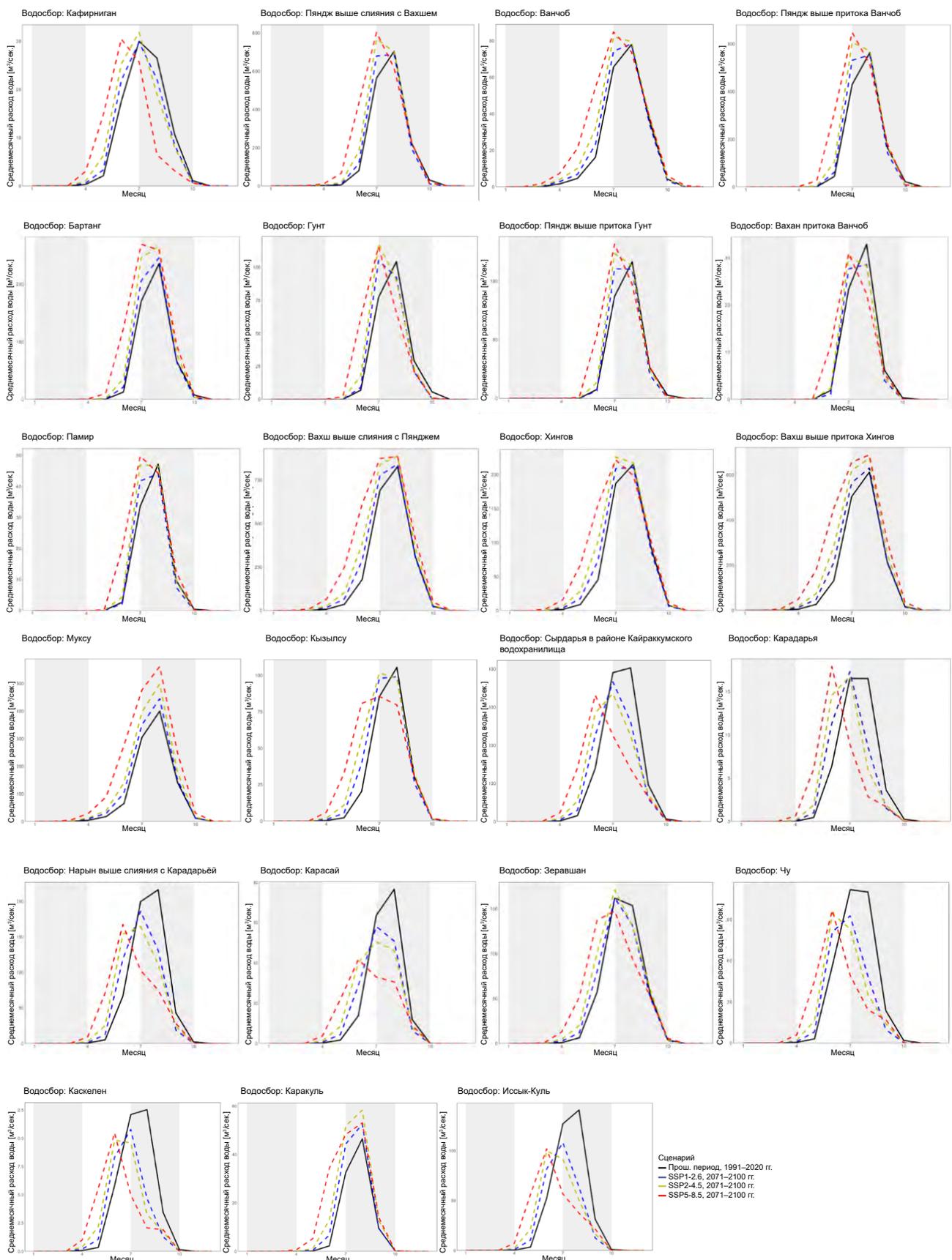


Рисунок S3. Относительное изменение (от настоящего времени до 2100 года) вклада талых вод ледников в общий годовой речной сток в разбивке по водосборным бассейнам для трёх сценариев выбросов в мае (вверху), июне (в середине) и июле (внизу)

Оптимистичный (SSP1-2.6)

Промежуточный (SSP2-4.5)

Пессимистичный (SSP5-8.5)

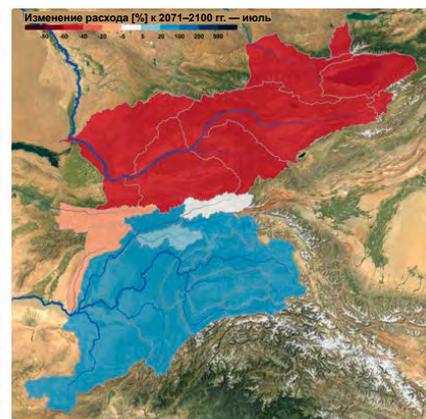
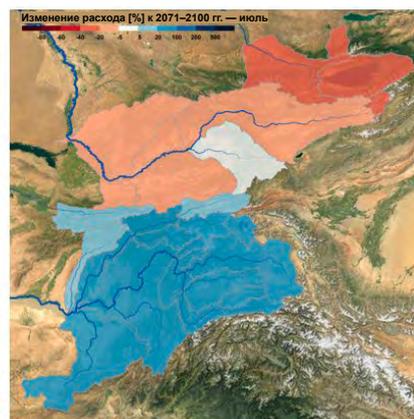
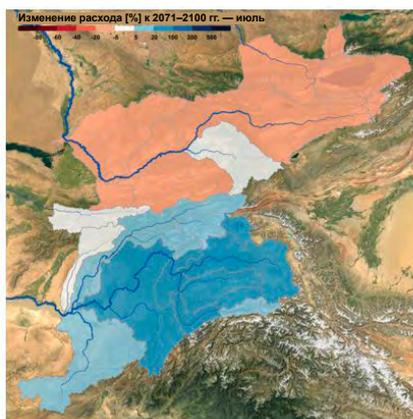
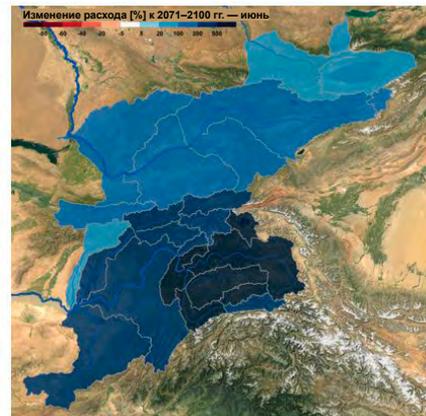
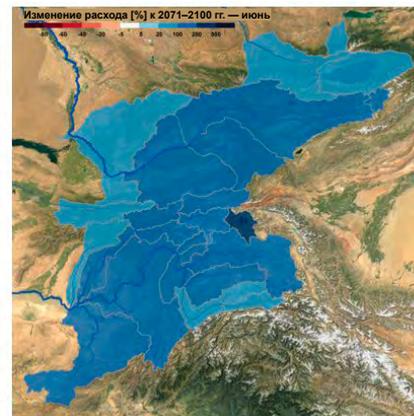
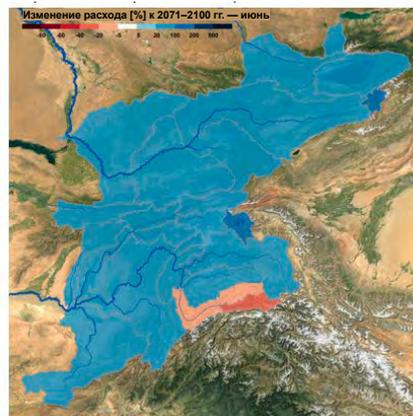
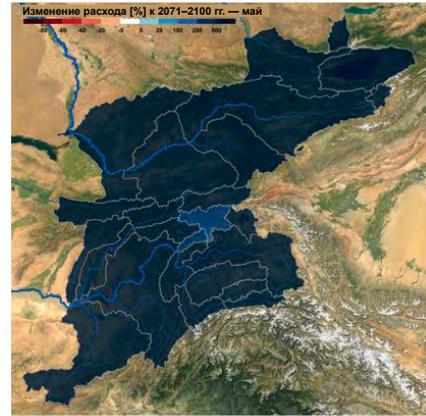
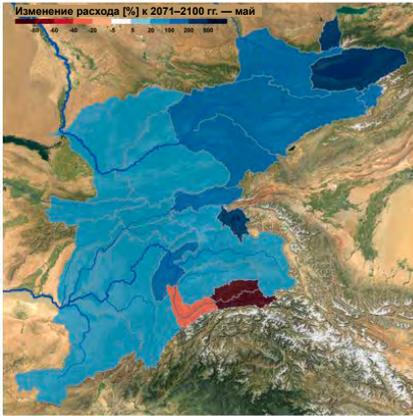


Рисунок S4. Относительное изменение (от настоящего времени до 2100 года) вклада талых вод ледников в общий годовой речной сток в разбивке по водосборным бассейнам для трёх сценариев выбросов в августе (вверху), сентябре (в середине) и октябре (внизу)

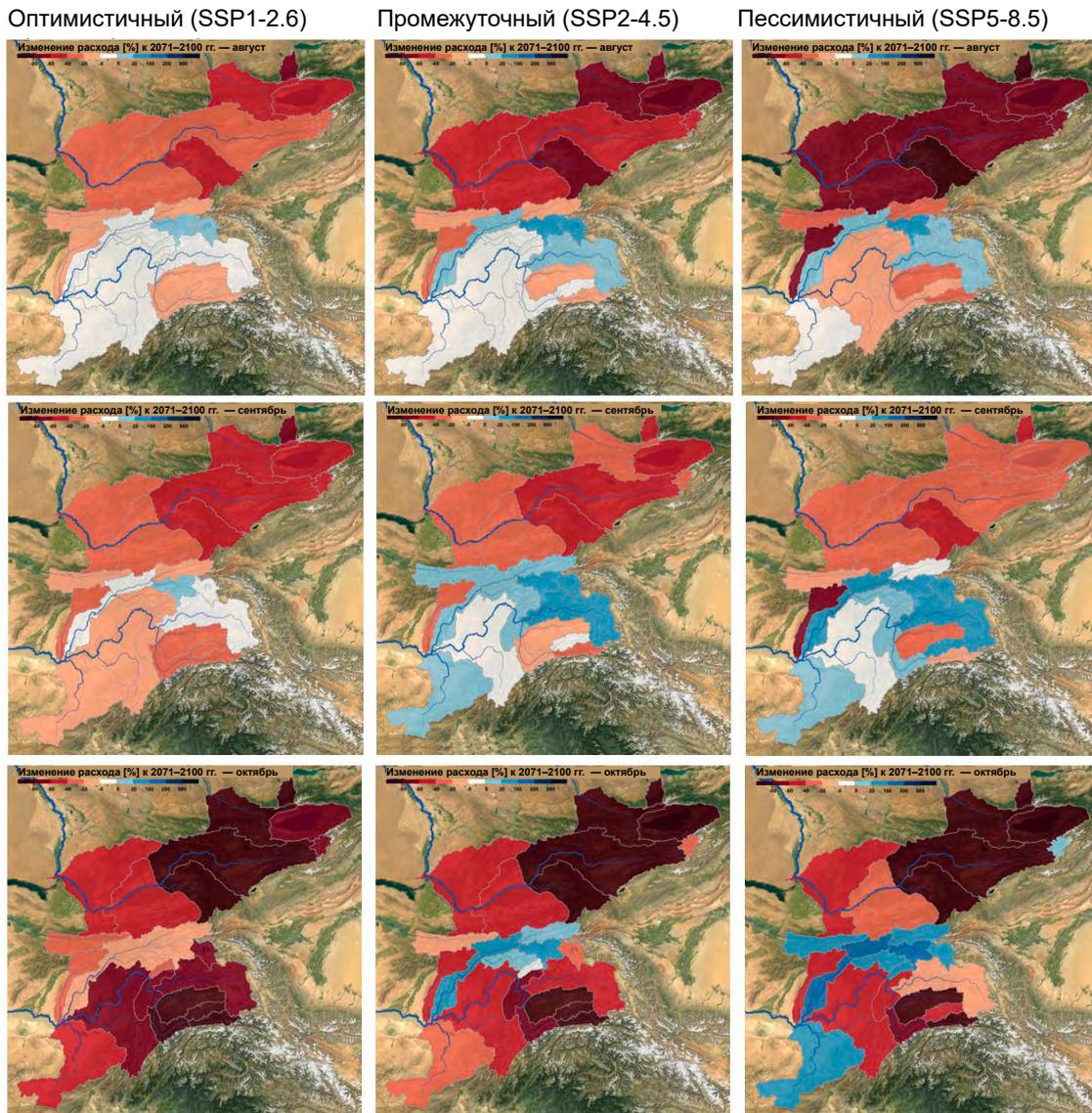
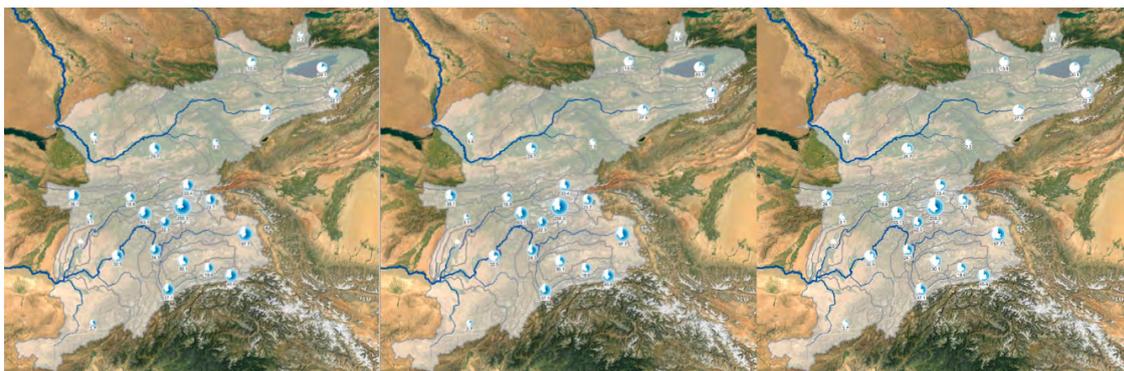


Рисунок S5. Потери объёма льда в масштабах всего водосбора для всех сценариев. Синий цвет на круговых диаграммах указывает на изменение объёма к 2040, 2060, 2080 и 2100 годам (от самого светлого к самому тёмному) по отношению к объёму льда в 2020 году (число под круговой диаграммой, в км³).





Проект ГЭФ-ПРООН-ЮНЕСКО
«Укрепление устойчивости стран Центральной Азии путем содействия региональному сотрудничеству в области оценки нивально-гляциальных систем для разработки комплексных методов устойчивого развития и адаптации к изменениям климата»

При поддержке:



Реализуется:



Исполняется:



В партнерстве с:



Следите за новостями проекта:

- www.cryosphereca.org
- [unescoalmaty](https://www.instagram.com/unescoalmaty)
- [unescoalmaty](https://www.facebook.com/unescoalmaty)
- [unescoalmaty](https://twitter.com/unescoalmaty)
- [unescoalmaty](https://www.telegram.com/unescoalmaty)