



Диагностический анализ

современного состояния криосферы и её влияния на обеспеченность
Центральной Азии водными ресурсами

БЛАГОДАРНОСТИ

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 совместные усилия в создание настоящего труда.

Данная публикация является свидетельством духа сотрудничества, который поддерживается самоотверженными усилиями национальных научно-исследовательских институтов Центральной Азии. Их неоценимый вклад, как с точки зрения опыта, так и материалов, сыграл важную роль в формировании всеобъемлющего характера представленного диагностического анализа.

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 Фрибурским университетом, за их участие в финансировании этой работы.

Наконец, мы выражаем благодарность за кропотливую и упорную работу авторам, чьё стремление к совершенству отражено на каждой странице настоящего документа (в алфавитном порядке): Атанов Серикжан, Азисов Эрлан, Барадун Мартина, Гульмураева Бибинур, Егоров Александр, Иманалиева Перизат, Кабутов Хусрав, Капица Василий, Карандаева Лидия, Касаткин Николай, Каюмов Абдулхамид, Кенжебаев Руслан, Кисебаев Даulet, Кокарев Александр, Куранбаева Зульфия, Мамаджанова Гавхар, Матис Тамара, Маттеа Энрико, Молдобеков Болот, Наврузшоев Хофиз, Пиманкина Нина, Поль Эрик, Сайдалиева Зарина, Сакс Томас, Северский Игорь, Умирзаков Гуломжон, Усаров Зохид, Усманова Замира, Фиддес Джоэл, Хельцле Мартин, Шестерова Ирина.

Ваш опыт, энтузиазм и преданность делу сыграли важную роль в выполнении данного комплексного анализа, который вносит значительный вклад в дело изучения криосферы и её влияния на обеспеченность Центральной Азии водными ресурсами.

Спасибо всем вам за неоценимый вклад и приверженность развитию научных знаний в этой важнейшей области.

СОДЕРЖАНИЕ

БЛАГОДАРНОСТИ	2
ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ГЛАВА 1. РОЛЬ КРИОСФЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В ОБЕСПЕЧЕННОСТИ РЕГИОНА ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ	7
1.1. Снежный покров: сезонные запасы воды.....	8
1.2. Ледники: замороженные резервуары пресной воды	12
1.3. Многолетняя мерзлота: мёрзлое основание	13
Заключение.....	16
ГЛАВА 2. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ	17
2.1. Обзор водных ресурсов Центральной Азии	17
2.2. Изменение структуры водных ресурсов в условиях изменения климата	22
2.3. Проблемы, связанные с водными ресурсами	24
Заключение.....	26
ГЛАВА 3. ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ.....	27
3.1. Климатическая обстановка в Центральной Азии	27
3.2. Изменение климата в Казахстане	29
3.3. Изменение климата в Кыргызстане.....	33
3.4. Изменение климата в Таджикистане	35
3.5. Изменение климата в Туркменистане.....	40
3.6. Изменение климата в Узбекистане	45
ГЛАВА 4. ИЗМЕНЕНИЯ в КРИОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ.....	51
4.1. Изменения в криосфере Казахстана.....	51
4.2. Изменения в криосфере Кыргызстана	57
4.3. Изменения в криосфере Таджикистана	64
4.4. Изменения в криосфере Узбекистана	72
4.5. Перспективы мониторинга криосферы.....	80
ГЛАВА 5. МОНИТОРИНГ И ДАННЫЕ О КРИОСФЕРЕ	82
5.1. Сеть мониторинга снежного покрова Центральной Азии	84
5.2. Сеть мониторинга ледников Центральной Азии.....	85
5.3. Сеть мониторинга многолетней мерзлоты Центральной Азии	87
5.4. Сеть гидрологического мониторинга Центральной Азии.....	89
5.5. Сбор и распространение данных.....	90

ГЛАВА 6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ	92
6.1. Мониторинг снежного покрова	92
6.2. Мониторинг ледников	93
6.3. Мониторинг многолетней мерзлоты	95
6.4. Вклад талых вод криосферы в общий объём речного стока	96
6.5. Временные ряды климатических данных	97
6.6. Трансграничное сотрудничество	98
Список литературы	100

ПРЕДИСЛОВИЕ

Несмотря на исключительно важную роль криосферы Центральной Азии в обеспечении водой миллионов жителей и экосистем низовий рек, вызванные климатом изменения в Центральной Азии носят драматический характер и недостаточно хорошо изучены. Основные горные системы Центральной Азии — Тянь-Шань и Памир — уникальны по своей гидроклиматической и криосферной неоднородности, обусловленной разнообразием топографических и климатических условий, приводящих к формированию сложных режимов стока и геологических рисков. Их верховья являются важнейшими источниками водоснабжения засушливой Центральной Азии, что делает Тянь-Шань и Памир одними из самых важных горных «водонапорных башен» в мире. Условия и характер сезонного снежного покрова, вносящего более 50% в годовой водный баланс, изменяются, что имеет последствия для низовий. Ледники служат жизненно важными резервуарами пресной воды в засушливые периоды. Таяние многолетней мерзлоты, в свою очередь, сопряжено с различными опасностями, включая дестабилизацию скальных откосов и селевые потоки, увеличение количества наносов в реках, просадку грунта и изменения в гидрологических режимах подземных вод.

Попытка объяснить наблюдаемую и моделируемую неоднородность реакции криосферы на изменение климата в Центральной Азии предпринималась в рамках различных исследований, однако многие процессы и их последствия остаются необъяснямыми, во многом из-за острой нехватки данных прямых измерений. Существует настоятельная необходимость лучше изучить криосферу региона и её взаимодействие с атмосферой и гидросферой. Прогнозы будущей реакции ледников сопряжены с неопределенностью, связанной, например, с неполным пониманием климатических и неклиматических факторов, возможностями моделирования обломочного покрова ледников и недостаточным пониманием поведения пульсирующих ледников. Прогнозы в отношении снежного покрова связаны с неизвестным будущим распределением снежного покрова (дождь вместо снега). Неизвестная толщина будущего снежного покрова также влияет на точность моделирования температуры многолетней мерзлоты и картины прогнозируемого приземного энергетического баланса. Участки поверхности земли с многолетней мерзлотой реагируют особенно быстро, когда мерзлота близка к точке замерзания, что делает точность прогнозов очень зависимой от точности моделирования термического режима многолетней мерзлоты.

Климатические сценарии предсказывают устойчивое потепление в ближайшие десятилетия. Однако уровень неопределенности в этих данных остается высоким. Улучшение понимания будущих климатообразующих факторов в целях прогнозирования изменений криосферы является приоритетной задачей, учитывая расхождения в данных о климате прошлых лет по всей Центральной Азии. Субрегиональные оценки климатических переменных, сочетающие наблюдения *in situ*, косвенные данные дистанционного зондирования и числовые модели, имеют решающее значение для более точного изучения воздействия изменений климата.

Настало время провести комплексный мониторинг взаимосвязи атмосферы, криосферы и гидросферы, чтобы обеспечить базисные данные для будущих прогнозов в отношении основных «водонапорных башен» региона. Регион, характеризующийся экстремальными климатическими условиями и сложным рельефом, в значительной степени зависит от криосферы, что делает необходимым понимание её динамики для обеспечения доступности воды в будущем. Водные ресурсы Центральной Азии, берущие начало в горах Памира и Тянь-Шаня, играют важнейшую роль в социально-экономическом развитии региона. Только на основе достоверных научных знаний можно разработать и реализовать устойчивые стратегии адаптации. Будучи признанной «горячей точкой» изменения климата, регион сталкивается с серьёзными проблемами, особенно затрагивающими уязвимое население горных районов, занимающееся натуральным хозяйством и скотоводством. Каждая страна Центральной Азии

сталкивается с особыми проблемами управления водными ресурсами, требующими принятия комплексных подходов, реализации международного сотрудничества и адаптационных мер.

В настоящем докладе собраны современные знания о наблюдаемых и прогнозируемых изменениях климата, их влиянии на криосферу Центральной Азии и о важнейшей роли снежного покрова, ледников и многолетней мерзлоты на динамику водных ресурсов. Детальный анализ климатических и криосферных изменений в Казахстане, Кыргызстане, Таджикистане, Туркменистане и Узбекистане выявляет специфические для региона последствия для водных ресурсов, что требует постоянного мониторинга, научно-исследовательской работы, а также усилий по укреплению трансграничного сотрудничества. В данном докладе мы стремимся выявить существующие пробелы в знаниях и сформулировать стратегии по улучшению методов и процессов мониторинга и научно-исследовательской работы по изучению взаимосвязи климата, криосферы и водных ресурсов.

Глубокий анализ, представленный в данном докладе, имеет большое значение для выстраивания политических дискуссий в охваченных проектом странах Центральной Азии. Он закладывает прочную основу для разработки согласованных на национальном уровне планов действий. В связи с разнообразием гидроклиматических и криосферных характеристик, детальное осмысление динамики криосферы в регионе необходимо для понимания различных последствий изменения климата для стран региона. Памир и Тянь-Шань с их отличительными особенностями демонстрируют важность выработки индивидуальных мер по адаптации, учитывающих проблемы каждой отдельной страны. Данный анализ служит руководством к действию, подчёркивая сложность реакции криосферы на изменение климата и обеспечивая основу для разработки согласованных стратегий адаптации в регионе.

ГЛАВА 1. РОЛЬ КРИОСФЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В ОБЕСПЕЧЕННОСТИ РЕГИОНА ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

Серикжан Атапов^a, Томас Сакс^a, Мартина Барандун^a

^a Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

Ледники, являющиеся яркими индикаторами потепления климата, представляют собой важнейшие резервуары пресной воды для Центральной Азии. Несмотря на их значимость, всестороннее понимание их исторического, современного и будущего воздействия на водный баланс региона остаётся неудовлетворительным (Giorgi et al., 2006). Реакция криосферы на изменение климата в Центральной Азии характеризуется разнообразием пространственных и временных характеристик, 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; Nüssler, 2017; Nüssler et al., 2019). Эти районы особенно уязвимы к межгодовым и резким колебаниям в водоснабжении, что усугубляет и без того повышенную уязвимость стран Центральной Азии к природным и антропогенным угрозам (Fay & Patel, 2008). С ростом населения и расширением водохозяйственной деятельности важность надёжного водоснабжения возрастает, а одновременное увеличение нагрузки на водные ресурсы (Pohl et al., 2017) и конкуренция за ограниченные ресурсы создают проблемы для адаптационного потенциала сельских районов (Garcia & Brown, 2009; Nüssler et al., 2019). Важно отметить, что эти проблемы усугубляются зачастую нехваткой финансовых и институциональных ресурсов для этих районов (Manandhar et al., 2018).

В регионе Центральной Азии наблюдается разнообразие гидрологических режимов, на которые влияют снеготаяние, талые ледниковые воды, атмосферные осадки и подземные воды. Айзен и соавт. (Aizen et al., 1995) разделили Тянь-Шань по четырём гидрографическим режимам, каждый из которых имеет свои особенности формирования стока:

1. Реки снегового питания: источником воды для этих рек является в основном постепенное таяние сезонного снежного покрова. Сроки и масштабы снеготаяния играют важную роль в формировании их гидрологического режима.
2. Реки ледникового питания: основным источником питания этих рек являются ледниковые талые воды. Доля ледникового стока зависит от площади ледниковых территорий в бассейне.
3. Реки дождевого питания: эти реки, расположенные в районах с максимальным количеством осадков в летний период, таких как Южный и Восточный Тянь-Шань, питаются в основном за счёт прямых осадков в виде дождя. Они обычно меньше по размеру и могут выходить в предгорные долины и за пределы горных хребтов.
4. Реки, питающиеся подземными водами: источники подземных вод вносят значительный вклад в сток этих рек. Наличие подземных вод играет определяющую роль в их гидрологических характеристиках.

Формирование стока и водообеспеченность в Тянь-Шаньском регионе тесно связаны с вкладом снежного покрова и ледников. Снежный покров является важнейшим источником воды для многих рек Тянь-Шаня (Aizen et al., 1995). Доля снеготаяния в общем стоке увеличивается с высотой и достигает 40 % на высотах от 2000 до 3500 метров над уровнем моря. Выше этих высот вклад снега и талых ледниковых вод быстро увеличивается и составляет 55–60 % от общего стока в Северном, Центральном и Восточном Тянь-Шане (Aizen et al., 1995).

На высоте 3800–4000 м над уровнем моря в Тянь-Шане талые ледниковые воды становятся доминирующим источником питания рек. В бассейнах с обширным ледяным покровом ледниковый

сток может составлять до 45 % от общего стока. В среднем ледниковый сток составляет 15–20 % от общего речного стока во всём Тянь-Шаньском регионе (Aizen et al., 1995). В сухой сезон с июля по сентябрь, когда сток в неледниковых бассейнах снижается из-за уменьшения количества осадков и повышения температуры, в бассейнах, питаемых ледниками, поддерживается постоянный запас воды (Aizen et al., 1995; Sorg et al., 2012; Armstrong et al., 2019).

Центральная Азия — преимущественно засушливый и полузасушливый регион (Barry, 1992) с высокой сезонной изменчивостью, обусловленной континентальностью климата региона (Haag et al., 2019), а большинство антициклонов и циклонов формируются за пределами Центральной Азии (Рязанцева, 1965). На метеорологические условия над Центральной Азией оказывает влияние основное направление крупномасштабной атмосферной циркуляции с запада на восток (западные ветры). Отклонение этих западных пассатов к северу и югу в отрогах Тянь-Шаня и Памира приводит к интенсивному выпадению осадков (Pohl et al., 2017) и под влиянием этого барьерного эффекта к усилению степени засушливости в направлении центра и востока (Schienmann et al., 2008). В сочетании с влиянием индийского летнего муссона на юге и сибирской антициклонической деятельности с севера это приводит к выраженным контрастам в климатических условиях в пределах Тянь-Шаня и Памира, которые отражаются в неоднородных криосферных реакциях (Brun et al., 2019; Barandun et al., 2021; Barandun & Pohl, 2023). Таким образом, взаимодействие крупномасштабной атмосферной циркуляции и топографических эффектов играет ключевую роль в неоднородном распределении криосферных компонентов в условиях меняющегося климата.

1.1. Снежный покров: сезонные запасы воды

Айзен и соавторы (Aizen et al., 1995) при описании формирования осадков и влажности делят Тянь-Шань на пять отдельных районов на основе взаимодействия между сибирской антициклонической циркуляцией и западной циклонической деятельностью.

Западный, Юго-Западный Тянь-Шань и Памиро-Алай. В этот район входят Ферганский, Пскемский, Чаткальский и Гиссарский (Памиро-Алайский) горные хребты. Большое количество снега выпадает в зимне-весенний период благодаря взаимодействию сибирской антициклонической и юго-западной циклонической циркуляций и барьерному эффекту на западной орографической окраине (Aizen et al., 1995; Schienmann et al., 2008). Струйное течение приносит особенно тёплые и влажные воздушные массы при движении с юга на север в конце зимы, что приводит к выпадению значительного количества зимних осадков на западной окраине, в отличие от других районов Тянь-Шаня, где зимы сухие. Непрерывное движение струйного течения на север до поздней весны создаёт температурный контраст между севером и югом и усиливает циклоническую активность над всей Центральной Азией (Schienmann et al., 2008). Как следствие, наибольшее количество осадков, характеризующееся сильными ливнями и грозами, выпадает в марте и апреле. После этого пика количество осадков уменьшается в августе и сентябре во время формирования летнего термического минимума (Aizen et al., 1995), когда струйное течение обычно находится над северной частью Центральной Азии. Второй пик осадков приходится на осень, в основном на ноябрь (Aizen et al., 1995), когда струйное течение осенью снова начинает перемещаться на юг, вызывая нестабильность выпадения осадков (Schienmann et al., 2008).

Северный Тянь-Шань. Этот район, включающий хребты Таласский, Киргизский, Кунгейский Алатау, Заилийский и Джунгарский Алатау, имеет ярко выраженный сезонный режим. Зимой влияние струйного течения на Тянь-Шане слабое (за исключением западной окраины), а сибирская система высокого давления создаёт ясную и спокойную зимнюю погоду, уменьшая количество зимних осадков на севере и востоке (Aizen et al., 1997). Таким образом, наименьшее количество осадков выпадает в январе.

Максимумы достигаются в весенне-летний период — с апреля (ниже 1000 м над уровнем моря) по июнь (выше 3000 м над уровнем моря), с перемещением струйного течения к северу в мае (Aizen et al., 2001). Эти пики связаны с фронтальной циклонической циркуляцией и приходом холодных, влажных воздушных масс. На высотах ниже 3000 м над уровнем моря второй пик приходится на осень, когда северное струйное течение смещается в более высокие широты (Aizen et al., 1995).

Центральный Тянь-Шань. Расположенный к югу от Терскейского, Киргизского и Таласского Алатау, с Ферганским хребтом на западе и хребтами Какшаал-Тоо и Меридиональным на юге и востоке, этот район характеризуется сильным влиянием орографического экранирования и, соответственно, ограниченным количеством зимних осадков, особенно в январе и феврале, составляющим всего 8–10 % от годового количества. В начале лета циклоническая активность ослабевает и начинают формироваться термические минимумы (Aizen et al., 1997). Летом сибирская антициклоническая циркуляция приносит холодные и влажные воздушные массы на северный, центральный и восточный Тянь-Шань, что приводит к частым весенним и летним осадкам (Aizen et al., 1997). Усиление конденсации приводит к увеличению количества осадков на больших высотах. В результате развития конвекции и стратификации атмосферы пик летних осадков приходится на июнь-июль, что вызвано исключительно приходом холодных влажных воздушных масс с запада (Aizen et al., 1995).

Юго-Восточный и Восточный Тянь-Шань. Этот район включает южные склоны Какшаал-Тоо, восточные горы ледникового массива Хан-Тенгри и прилегающие хребты Боро-Хоро и Богдо-Ула. Хотя летний пик осадков здесь такой же, как и в Центральном Тянь-Шане, общее количество осадков в этом районе меньше. Сильная циклоническая циркуляция с юга может приводить к интенсивным обильным осадкам (Zhang, 1987). В зимний период осадки выпадают в основном выше 2000 м над уровнем моря и являются редкими. Максимальное количество осадков выпадает в июне-июле (Aizen et al., 1995).

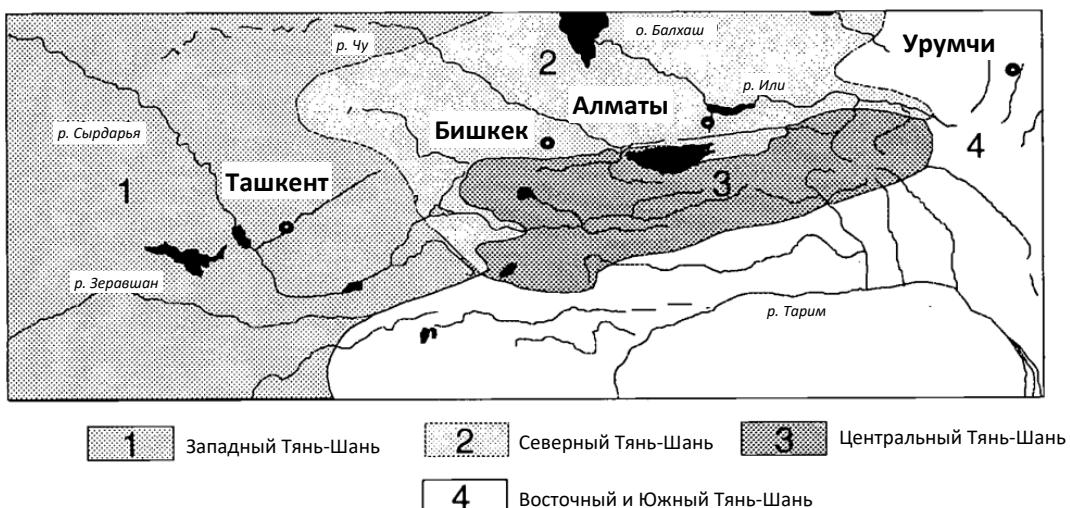


Рисунок 1.1.1. Районирование Тянь-Шаня по режиму выпадения осадков (Источник: Aizen et al., 1995)

На основании гляцио-климатического режима и ландшафта Памира Айзен (Aizen, 2011) предложил деление Памира на пять основных районов: Памиро-Алайский, Западно-Памирский, Центрально-Памирский, Юго-Восточно-Памирский и Восточно-Памирский. Однако в литературе варианты деления на районы существенно различаются, а сами способы деления несколько неоднозначны (Barandun et al., 2021; Moelg et al., 2018; Brun et al., 2019).

Западный Памир. По мнению Айзена (Aizen, 2011), Западный Памир — это западные отроги Памира, где выпадает наибольшее количество осадков, достигающее 2000–2500 мм в год. Как и Западный Тянь-Шань, этот район находится под влиянием движения струйного течения в северном направлении, а также, в некоторой степени, индийского летнего муссона, оба из которых несут влажный и тёплый воздух.

Центральный Памир. Центральный Памир, описанный Айзеном (Aizen, 2011), в другой литературе часто классифицируется как часть Западного Памира (Mölg et al., 2018). В этом районе расположены самые высокие зоны скопления ледников, достигающие 7400 м над уровнем моря, и крупнейший в мире высокогорный ледник за пределами полярных регионов — ледник Федченко. Годовое количество осадков на Центральном Памире колеблется между 800 и 1500 мм (Aizen, 2011) и находится под влиянием движения струйного течения с юга на север в конце зимы и весной, а также с севера на юг осенью. Высокие вершины этого района на его восточных отрогах служат барьером для тёплых и влажных воздушных масс западных ветров, отклоняющихся на юг и север.

Восточный Памир. Восточный Памир по Айзену (Aizen, 2011) включает в себя большое высокогорное плато, простирающееся на высоте более 4000 м над уровнем моря и занимающее площадь около 100 тыс. км². Восточный Памир включает район озера Каракуль и простирается на территорию Китая. Этот район Памира, защищённый с запада и юга, имеет чрезвычайно засушливый климат с годовым количеством осадков всего от 50 до 150 мм. Чрезвычайно сухой воздух и высокая солнечная радиация создают идеальные условия для испарения влаги с поверхности снега и льда в летние месяцы (Aizen, 2011). Тибетский антициклон влияет на климат восточных отрогов (Archer & Fowler, 2004), что приводит к частым летним осадкам на восточной окраине района. В другой литературе этот район часто разделяют на китайский Памир, классифицируемый как Восточный Памир, и восточную часть таджикского Памира, относящуюся к Западному Памиру.

Юго-Восточный Памир. В целом, в южной части Памира уровень осадков ниже, чем в Центральном и Восточном Памире. Общее годовое количество осадков в этой части Памира невелико и колеблется между 93 мм/год (метеостанция Мургаб) и 182 мм/год (метеостанция Шаймак), при этом значительная часть осадков выпадает в виде снега (Pohl et al., 2015). Наиболее доминирующим источником влаги на южных отрогах Памира являются обильные осадки, выпадающие в результате индийского летнего муссона (Cadet, 1979). Однако наличие орографического барьера на южных и юго-восточных отрогах Памира значительно снижает поступление влаги и приводит к образованию очень сухих условий в северной, центральной и восточной частях района (Boos and Kuang, 2010; Haag et al., 2019).

Памиро-Алай. Этот район очень похож по своим характеристикам на Западный и Юго-Западный Тянь-Шань с большим количеством зимних осадков, первым пиком осадков весной и нестабильностью осадков осенью, приводящей ко второму пику осадков в ноябре (Aizen et al., 1995). Сеть наблюдений на леднике Абрамова на высоте 3837 м над уровнем моря является одной из немногих долгосрочных станций мониторинга на Памиро-Алае. Общее годовое количество осадков на станции измерялось с 1968 по 1998 год и составляло в среднем 750 мм/год с максимумом в период с марта по май (Pertziger, 1996). Район имеет сильный вертикальный градиент осадков 1200 мм/км/год (Кислов, 1982).

Сезонный снежный покров составляет значительную часть годового водного баланса в Центральной Азии, внося более 50 % в водный эквивалент снега в первичных бассейнах (Hoelzle et al., 2017). По данным Армстронга и соавторов (Armstrong et al., 2019), дистанционное зондирование и моделирование таяния в градусо-сутки показали, что вклад сезонного снега может достигать 65–72 % от среднегодового стока в бассейнах Амударья и Сырдарьи. Это резко контрастирует с 23 %-ным вкладом осадков и 2–8 %-ным вкладом ледникового льда в годовой сток (Sorg et al., 2012; Aizen et al., 1995).

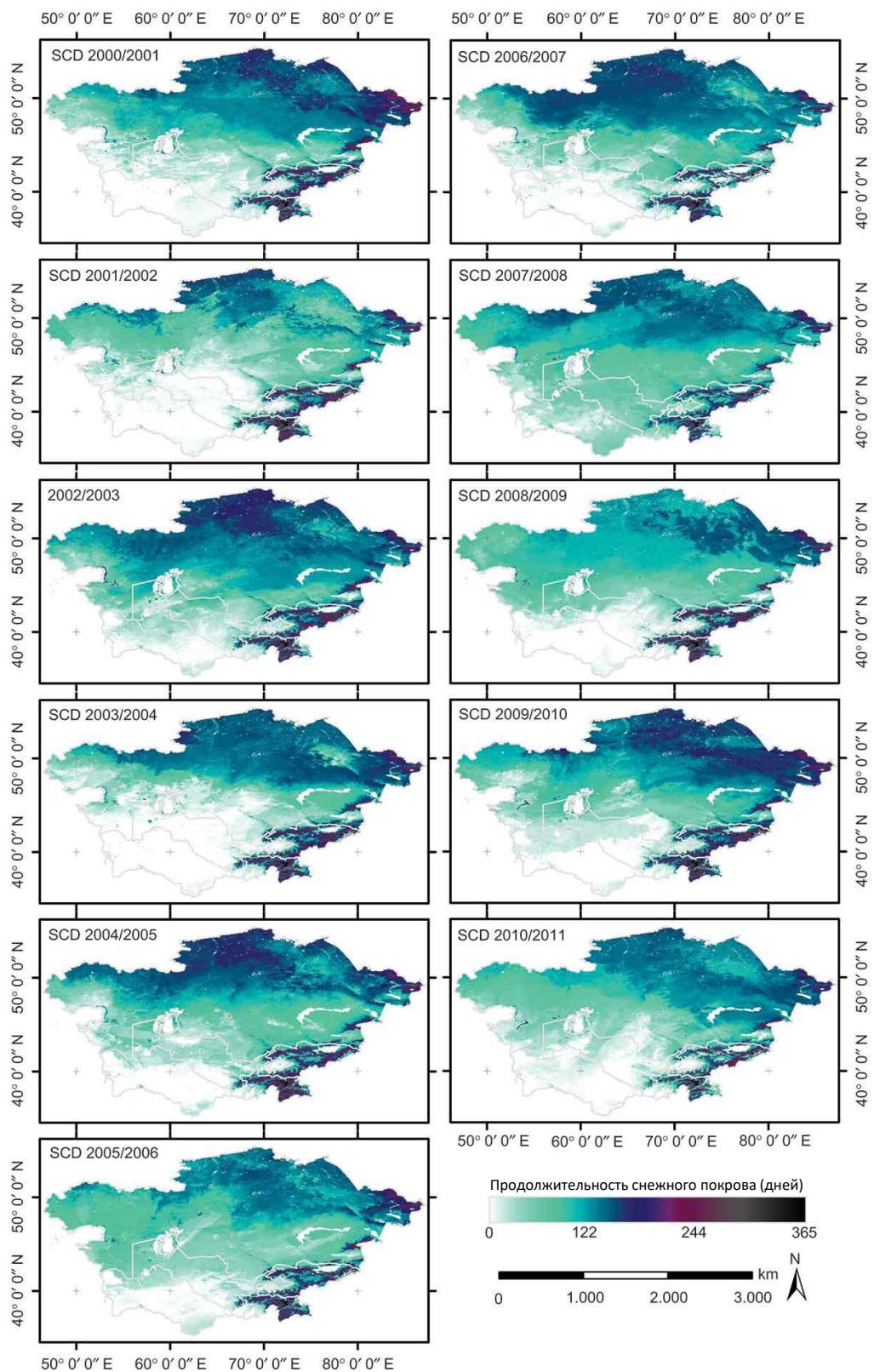


Рисунок 1.1.2. Число дней со снежным покровом с 2000/2001 по 2010/2011 гидрологические годы
 (Источник: Dietz et al., 2013)

Изменения в структуре снежного покрова могут влиять на динамику русел рек, приводя к снижению водного стока в критические периоды и повышенной изменчивости уровня воды в течение года. Последние данные, полученные как с помощью методов дистанционного зондирования (Adnan et al., 2017; Immerzeel et al., 2009; Peters et al., 2015), так и в результате измерений *in situ* (Marty 2008; Serquet et al., 2013), указывают на сезонное сокращение продолжительности и площади снежного покрова,

особенно на небольших высотах. Эти наблюдаемые изменения имеют серьёзные последствия для экосистем низовий, сельскохозяйственной деятельности и управления водными ресурсами (Aizen et al., 1995; Sorg et al., 2012; Unger-Shayesteh et al., 2013). Подчёркивается настоятельная необходимость принятия комплексных мер для эффективного решения проблем, связанных с изменением режима снежного покрова и его влиянием на водообеспеченность Центральной Азии.

1.2. Ледники: замороженные резервуары пресной воды

Ледники, от небольших альпийских до обширных ледяных щитов, демонстрируют постоянное движение под действием силы тяжести, формируя характерные ландшафты. Образование ледников начинается с накопления снега, который постепенно уплотняется в фирн, представляющий собой зернистый, плотно слежавшийся снег. Ледники реагируют на [повышающуюся] температуру воздуха таянием и, таким образом, являются жизненно важным источником пресной воды, особенно во время сезонного таяния, влияя на динамику гидрологического режима региона.

На горных хребтах Тянь-Шаня и Памира в Центральной Азии насчитывается более 25 тыс. ледников. На Тянь-Шане находится почти 15 тыс. ледников, занимающих площадь около 12,3 тыс. км² (Consortium, R., Randolph Glacier Inventory, 2017). На Памире находится более 13 тыс. ледников, которые занимают площадь около 12 тыс. км² (Mölg, et al., 2018). Ледники этого региона демонстрируют различную реакцию на изменение климата (Scherler et al., 2011; Kääb et al., 2012; Farinotti et al., 2015; Brun et al., 2017; Wang et al., 2017; Shean et al., 2020; Miles et al., 2021; Hugonnet et al., 2021; Barandun et al., 2020, 2021), что отражает описанные особенности климатических и топографических условий (рис. 1.2.1). Понимание характера этих реакций имеет решающее значение для оценки будущего стока рек и запасов водных ресурсов Центральной Азии. Исторически мониторинг баланса массы ледников начался в середине 1950-х годов в эпоху СССР (Dyurgerov, 2002; Кузьмичёнок, 2006), в большинстве случаев прекратился в начале 1990-х годов, вследствие чего образовался пробел в данных. В настоящее время только по леднику Туюксу в Казахстане имеются непрерывные данные, согласно которым баланс массы составляет $-0,4$ м в. э. в год с 1957 по 2022 год (WGMS, 2020). Усилия по восстановлению систем мониторинга ледников начались в 2010 году (Hoelzle et al., 2017), что, несмотря на определённые ограничения, вносит вклад в формирование региональных оценок.

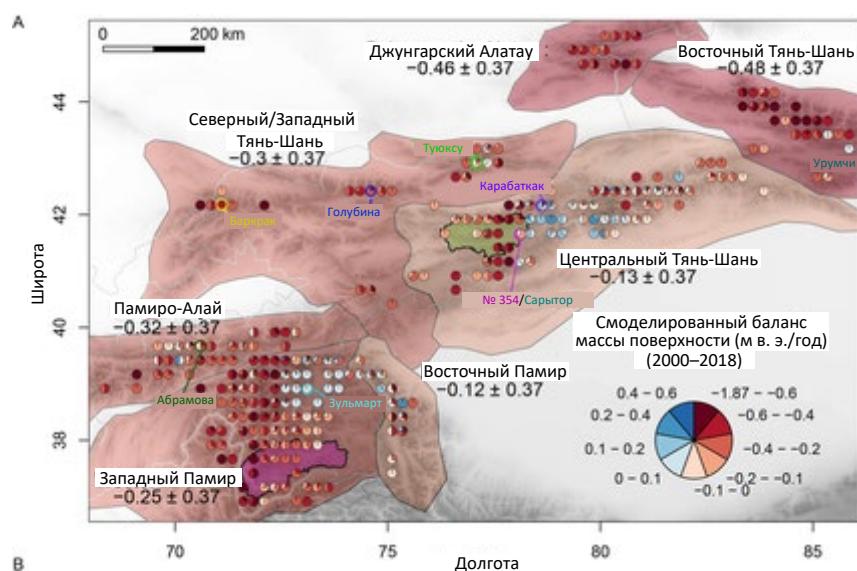


Рисунок 1.2.1. Неоднородность реакции ледников на Тянь-Шане и Памире (Источник: по материалам Barandun et al., 2021)

Ледниковые льды служат жизненно важным резервуаром пресной воды, высвобождая талую воду в засушливые и жаркие периоды, особенно летом. Воды таяния ледников существенно регулируют динамику речного стока, влияя на его сроки и объём, особенно в таких крупных реках, как Амударья и Сырдарья. В среднем таяние ледников составляет около 6 % стока Сырдарьи и 20 % стока Амударьи в год (Worni et al., 2013). В сезон таяния этот вклад может в 1,5–3 раза превышать среднегодовое поступление воды в бассейны рек (Saks et al., 2022; Armstrong et al., 2018). Таяние ледников обеспечивает надёжное водоснабжение сельского хозяйства, промышленности и охрану окружающей среды после истощения сезонного снежного покрова.

Изменение климата представляет угрозу для ледникового льда и водных ресурсов. Прогнозы предполагают увеличение стока весной и летом, что приводит к наводнениям в результате прорыва ледниковых озёр, селевым потокам 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).

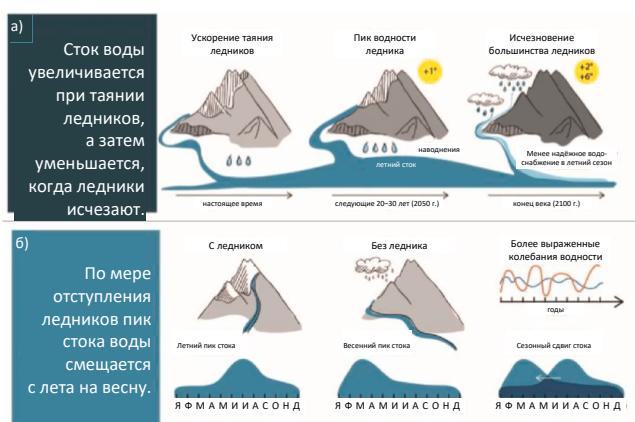


Рисунок 1.2.2. Схематическое изображение ожидаемых изменений стока при текущем ходе изменения климата: а) влияние на общий вклад талых вод ледников и б) сезонность наличия воды (Источник: Zoï Environment Network, Женева)

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).

Ледники Центральной Азии, являющиеся важнейшим источником пресной воды, сложным образом реагируют на изменение климата. Мониторинг этих ледников необходим для понимания будущей динамики водных ресурсов и смягчения воздействия изменения климата на регион.

1.3. Многолетняя мерзлота: мёрзлое основание

Центральная Азия, характеризующаяся высокогорными районами и континентальным климатом, имеет обширные площади многолетней мерзлоты, особенно в горных массивах Памира и Тянь-Шаня (рис. 1.3.1). Многолетняя мерзлота, определяемая как грунт, остающийся мёрзлым в течение двух и более лет, до сих пор недостаточно изучена.

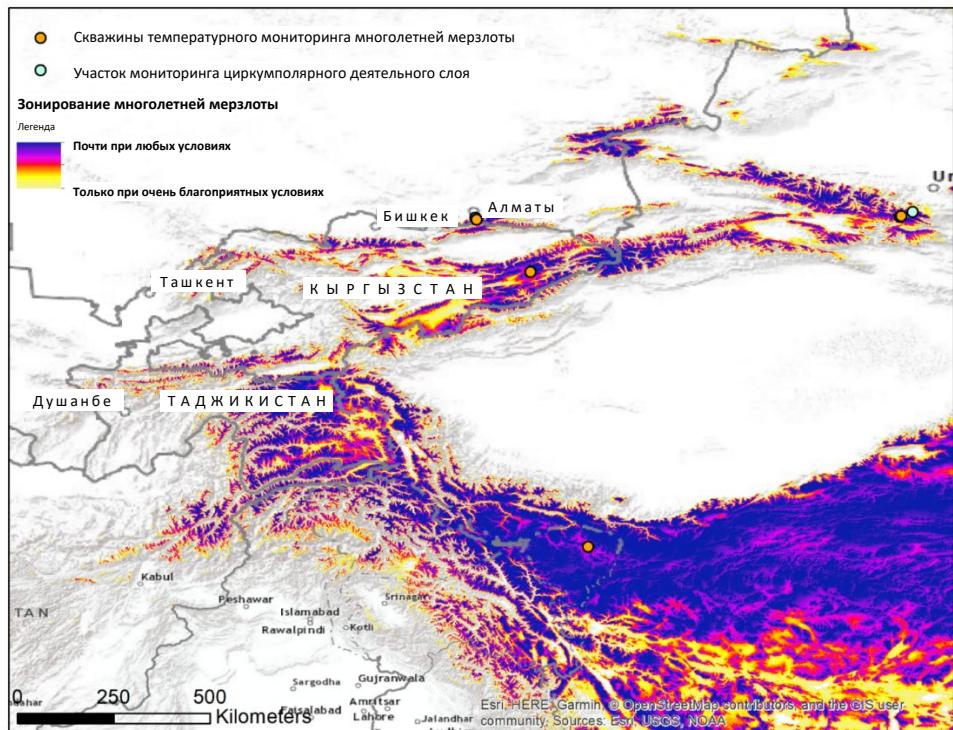


Рисунок 1.3.1. Обзор территории, на которой можно ожидать наличие многолетней мерзлоты в Высокогорной Азии (Источник: Gruber, 2012)

Занимая 15 % площади многолетней мерзлоты Северного полушария, многолетняя мерзлота Центральной Азии и Тибетского нагорья представляет собой самую большую площадь многолетней мерзлоты за пределами полярных регионов (Gruber, 2012). На распространение многолетней мерзлоты влияют такие факторы, как снеговые осадки, температура воздуха, солнечная радиация и местные особенности условий поверхностных и подповерхностных слоёв. Многолетняя мерзлота — это почва или грунт, температура которого постоянно остаётся ниже 0 °C (32 °F) в течение двух или более лет. Глубина мерзлоты варьируется от нескольких метров до нескольких сотен метров (Горбунов и соавт., 1996). Многолетняя мерзлота существенно влияет на гидрологию Центральной Азии, ограничивая инфильтрацию воды, влияя на пополнение запасов подземных вод и изменяя характер речного стока в низовьях.

Потепление горных склонов и многолетнемёрзлых грунтов имеет широкие последствия, воздействуя на местности далеко ниже по течению (Huggel et al., 2005; Walter et al., 2020). Прогнозируемые последствия включают увеличение скорости ползучести горных ледников (Delaloye et al., 2010; Sorg, 2015) и термически индуцированную нестабильность склонов, которые могут вызывать селевые потоки, горные лавины или наводнения в результате прорыва ледниковых озёр (Haeberli et al., 2017; Hoelzle et al., 2001; Gruber & Haeberli, 2007; Krautblatter et al., 2012). Кроме того, до сих пор неизвестно, будет ли многолетнемёрзлый грунтовый лёд в горах Центральной Азии играть существенную роль в региональном гидрологическом цикле (Huss & Hock, 2018). Анализ результатов мониторинга температуры грунта на леднике Абрамова, проведённый Перцигером (Pertziger, 1996), в сочетании с недавними наблюдениями на метеостанции «Ледник Абрамова» показывает увеличение средней температуры многолетней мерзлоты (рис. 1.3.2).

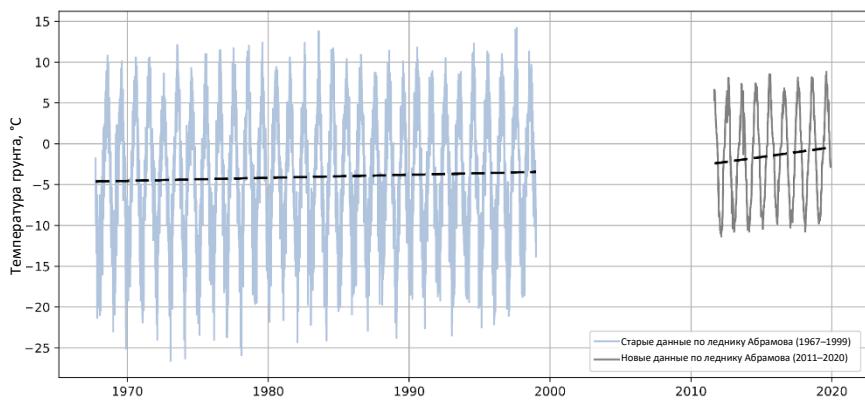


Рисунок 1.3.2. Наблюдаемые результаты измерения температуры грунта на леднике Абрамова, долина Коксу, Южный Кыргызстан. Видны чёткие тенденции на старых и новых площадках (источник данных: Pertziger, 1996 и метеостанция «Ледник Абрамова»).

Несмотря на теплоизолирующий эффект деятельного слоя грунта и вентилирующее действие воздушных потоков, многолетняя мерзлота постепенно реагирует на изменение климата, обеспечивая водные ресурсы в длительном масштабе времени (Delaloye & Lambiel, 2005; Wicky & Hauck, 2017; Jones et al., 2018; Janke et al., 2017). В настоящее время ведутся активные дискуссии, в основном в отношении Анд, о том, является ли многолетнемёрзлый грунтовый лёд важным фактором гидрологического цикла или нет (например, Arenson and Jakob, 2010; Arenson et al., 2022; Azocar & Brenning, 2010). Тем не менее, существуют факторы неопределенности в распределении многолетней мерзлоты и объёмов грунтового льда, что подчёркивает необходимость в обновлённых данных (Kenner et al., 2019; Hoelzle et al., 2001; Halla et al., 2020; Arenson & Jakob, 2010).

Влияние многолетней мерзлоты на режим речного стока многогранно: она влияет на динамику стока во время таяния снега и высвобождает воду во время оттаивания деятельного слоя в летний период. Прогнозы, основанные на сценариях CMIP5, свидетельствуют о продолжающейся деградации многолетней мерзлоты в Центральной Азии, что может привести к увеличению стока в низовьях рек (Rogger et al., 2017). Уязвимость многолетней мерзлоты к изменению климата представляет собой серьёзную проблему. Повышение температуры ускоряет деградацию многолетней мерзлоты, влияя на гидрологические режимы речных бассейнов. Таяние многолетней мерзлоты приводит к высвобождению парниковых газов, усиливая парниковый эффект (Koven et al., 2011). Исторические данные свидетельствуют о тенденциях потепления в горах Тянь-Шаня со времён Малого ледникового периода, причём по прогнозам тенденция роста температур сохраняется (Марченко и соавт., 2007; Forsythe et al., 2017). Недавние новые измерения в скважине в районе массива Акшийрак показали повышение температуры грунта на глубине 20 м примерно на +1,9 °C с 1986 по 2022 год, что фактически выше, чем показывают ряды температуры грунта в сопоставимых местах в Европейских Альпах (проект CROMO-ADAPT).

Понимание и устранение факторов уязвимости, связанных с деградацией многолетней мерзлоты, имеют решающее значение для устойчивого управления водными ресурсами в Центральной Азии. Мониторинг происходящих изменений и адаптация стратегий к меняющимся гидрологическим режимам крайне важны для обеспечения здоровья экосистем и эффективного управления рисками бедствий в регионе.

Заключение

Центральная Азия находится на перекрёстке динамичных климатических условий, 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, создавая как трудности, так и возможности в контексте продолжающегося изменения климата.

Роль атмосферной циркуляции в формировании структуры осадков на Тянь-Шане и Памире подчёркивает важность понимания региональных климатических вариаций. Изменения сезонного снежного покрова, который вносит значительный вклад в годовой водный баланс, требуют активного подхода к управлению меняющейся динамикой водных ресурсов. Обилие ледников на Тянь-Шане и Памире подчёркивает их важнейшую роль в качестве резервуаров пресной воды. Различные реакции ледников на изменение климата требуют постоянного мониторинга для оценки их влияния на будущее водных ресурсов в Центральной Азии. Обширная многолетняя мерзлота в регионе участвует в формировании гидрологических режимов, влияя на пополнение подземных вод и изменения структуру речного стока. Постепенность реакции многолетней мерзлоты на изменение климата в сочетании с неопределенностью в распределении и объёмах грунтового льда подчёркивает необходимость постоянного мониторинга.

Прогнозы об увеличении стока, потенциальных опасностях и уменьшении объёмов льда указывают на срочную необходимость разработки эффективных стратегий управления водными ресурсами. Тенденции потепления в горах Тянь-Шаня со времён Малого ледникового периода подчёркивают необходимость разработки адаптационных мер для решения проблемы изменения гидрологических режимов. Сложная динамика криосфера требует принятия целостного подхода к управлению водными ресурсами в Центральной Азии. Продолжающиеся усилия по мониторингу и исследованию изменений в криосфере жизненно важны для адаптации к меняющимся гидрологическим режимам и смягчения последствий изменения климата.

Для уточнения прогнозов и устранения неопределённостей, связанных с криосферными элементами, необходимы непрерывные исследования и мониторинг. 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. Криосфера играет ключевую роль в формировании гидрологической ситуации в Центральной Азии. Поскольку регион сталкивается с проблемами изменения климата, понимание, адаптация и смягчение воздействия на криосферу крайне важны для обеспечения устойчивого управления водными ресурсами и жизнестойкости Центральной Азии.

ГЛАВА 2. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Перизат Иманалиева^a, Серикжан Атанов^b, Мартина Барандун^b

^a Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызстан

^b Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

2.1. Обзор водных ресурсов Центральной Азии

Социально-экономическое развитие Центральной Азии в значительной степени зависит от ресурсов пресной воды (Абдуллаев и соавт., 2019). Страны Центральной Азии связаны между собой общими водными ресурсами, которые носят трансграничный характер. В водосборном бассейне вода обычно собирается в реки за счёт поверхностного стока от осадков, талой воды, выделяемой из естественных ледяных и снежных массивов, и подземных источников, таких как грутовые воды и родники. Более 6000 рек берут своё начало в горах, в том числе великие реки Амударья и Сырдарья (Духовный и соавт., 2014). Они питаются в основном за счёт таяния снега и ледников (от 70 до 80 %) с хребтов Памир, Гиндукуш и Тянь-Шань (Djumaboev et al., 2019; Armstrong et al., 2019). Снежный покров, ледники и многолетняя мерзлота являются основными компонентами криосферы. В то время как образованию талой воды из снега и ледников уделяется повышенное внимание, роль многолетней мерзлоты как водного ресурса до сих пор недостаточно изучена. Многолетняя мерзлота встречается в континентальных районах в высоких широтах, где температура грунта ниже 0 °C. Большая часть горных территорий находится в Кыргызстане и Таджикистане, которые наделены значительными водными ресурсами — около 26 % и 55 %, соответственно. Общий объём поверхностных водных ресурсов Центральной Азии составляет 120 км³, из которых годовой вклад Амударьи и Сырдарьи составляет 115,6 км³ в год (Сафонова, 2009). Однако сегодня общий объём речного стока этих двух рек, по оценкам, сократился до всего лишь 10 % из-за активного освоения водных ресурсов в верхнем течении бассейна Аральского моря (Djumaboev et al., 2019). Количество талых вод меняется из года в год, в основном в зависимости от количества снега, накапливающегося в горах в зимние месяцы (Эшмент, 2011; Armstrong et al., 2019). Помимо важной роли снега в годовом стоке, таяние ледников вносит значительный вклад в водообеспеченность в летние месяцы, когда запасы снега истощаются, а осадков выпадает мало (Saks et al., 2022; Aizen et al., 1995). Ледниковая талая вода поступает из долгосрочного резервуара — ледника, — образующегося в течение десятилетий и столетий (Armstrong et al., 2019).

Таблица 2.1.1. Состав и объём основных ресурсов поверхностных вод Центральной Азии (Сафонова, 2009)

Страна	Бассейн Амударья км ³ /год	Бассейн Сырдарья 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

Крупнейшими реками Центральной Азии являются Амударья и Сырдарья. Они входят в бассейн Аральского моря, в котором Амударья даёт около 78 км³ воды в год, а Сырдарья — около 37 км³ воды в год (табл. 2.1.1) (Сафонова, 2009). Водные ресурсы делятся между всеми пятью странами Центральной Азии, а также Афганистаном и Ираном (табл. 2.1.1). Основным поставщиком воды в Амударью является Таджикистан — 63 км³ в год, в то время как Сырдарья питается в основном за счёт

Кыргызстана — 27 км³ в год. На долю всех остальных стран приходится менее 10 % всех поверхностных водных ресурсов Центральной Азии, и они в значительной степени зависят от поступления воды из стран, расположенных выше по течению.

Амударья берёт начало в месте слияния рек Пяндж и Вахш (ранее также Зерафшан). Она течёт на протяжении 2540 км до впадения в Аральское море. Сырдарья начинается в Кыргызстане в месте слияния Нарына и Карадарьи. Её длина составляет 3019 км, и она также впадает в Аральское море. Две другие крупные реки бассейна — Чу и Талас. Они пересыхают, не доходя до Сырдарьи. Казахстан вносит 0,11 км³ воды в год (6,0 %), а Кыргызстан 0151 1,72 км³ воды в год (94 %) в среднегодовой сток Чу и Таласа. Каркара получает 0,23 км³ воды в год (38 %) из Казахстана и 0,37 км³ воды в год (62 %) из Кыргызстана (Тологонов, 2022). Среднегодовой сток рек бассейна Тарима, оценённый в границах Кыргызстана, составляет 6,99 км³ воды в год (Тологонов, 2022).

Казахстан. В Казахстане насчитывается 85 022 реки и временных водотоков (Тюменев, 2008). Иртыш — самый длинный в мире приток реки. Его длина в пределах Казахстана составляет 1700 км (общая длина 4248 км). Вторая по величине река — Сырдарья, длина которой в пределах страны составляет 1400 км (общая длина 2219 км). На территории страны расположены крупнейшие в мире озёра — Каспийское и Аральское. Общий объём воды в озёрах Казахстана превышает 190 км³ (Тюменев, 2008). В таблице 2.1.2 и на рисунке 2.1.1 представлены ресурсы поверхностных вод по всем речным бассейнам Казахстана и показана доля воды, поступающей из местных источников и из соседних стран.

Таблица 2.1.2. Фактические ресурсы речного стока Казахстана, км³ в год (Источник: Турсунова, 2022)

Водохозяйственные бассейны	Местные ресурсы (км ³ в год)		Приток (км ³ в год)		Суммарный (км ³ в год)	
	Всего	В т. ч. отток за пределы Казахстана (возвратный)	Всего	В т. ч. сформированный на территории соседних стран	Всего	Суммарный с учётом антропогенных изменений в русле основной реки
Арало-Сырдарьинский	2,16	0,38	16,90	16,50	18,70	14,50
Балхаш-Алакольский	16,50	0,96	13,50	12,50	29,00	26,50
Ертисский (Иртышский)	26,50	1,36	8,32	6,96	33,40	29,40
Есильский	2,68	-	-	-	2,68	2,68
Жайык-/Урало-Каспийский	3,13	0,99	8,86	7,87	11,00	10,30
Нура-Сарысуйский	0,87	-	-	-	0,87	0,87
Тобол-Тургайский	1,68	-	0,45	0,45	2,12	2,12
Чу-Таласский	0,94	-	2,77	2,77	3,71	3,71
Итого	54,50	3,70	50,8	47,1	102,00	90,00

Поверхностные воды являются крупнейшим водным ресурсом для Казахстана с уровнем забора 90 % (Karataev et al., 2017a). Подземные воды составляют 10–15 % ресурсов поверхностных вод и на них приходится 4,6 % общего объёма забора (Karataev et al., 2017b). Использование опреснённой воды составляет 4 %, в основном в центральной и северной частях страны, где внешние водные ресурсы дефицитны. Водные ресурсы в перечисленных крупных бассейнах распределены неравномерно, при этом на три крупнейших водохозяйственных бассейна — Арал-Сырдарьинский, Ертисский (бывший Иртышский) и Балхаш-Алакольский — приходится почти 75 % всех водных ресурсов страны (Karataev et al., 2017b).

Казахстан до 45 % зависит от внешних водных ресурсов (табл. 2.1.2, Karatayev et al., 2017b). Помимо естественного распределения, вода непропорционально распределена между городским и сельским населением, как по количеству, так и по качеству (O'Hara et al., 2008). Водопотребление экономики составляет в среднем 32,5 км³ в год. Крупнейшим потребителем воды является сельское хозяйство — до 75 %; более 50 % этого объёма используется в Арало-Сырдарьинском бассейне, где традиционно развито орошаемое земледелие. Крупнейшие промышленные потребители воды находятся в промышленно развитых Ертисском (Иртышском), Нура-Сарысуйском и Урало-Каспийском бассейнах — от 20 до почти 40 %. Коммунально-бытовой сектор использует всего около 5 % вод в Казахстане (Достай, 2012; Медеу и соавт., 2020; Турсунова, 2022).

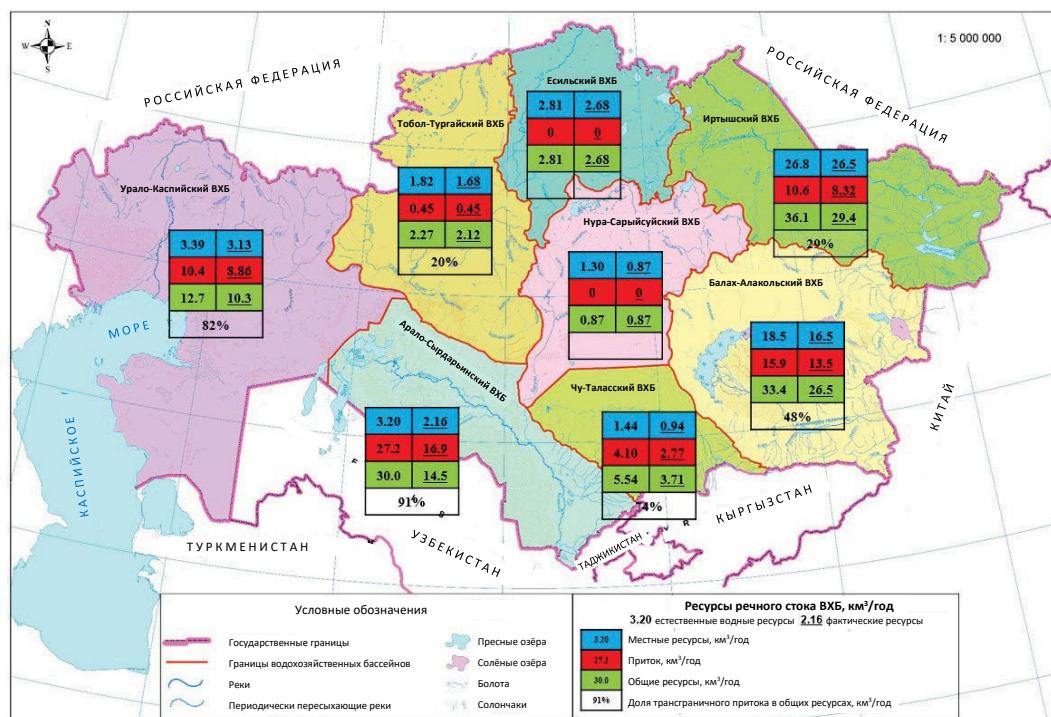


Рисунок 2.1.1. Ресурсы речного стока по различным речным водохозяйственным бассейнам Казахстана
(Источник: Турсунова, 2022)

Кыргызстан. Кыргызстан имеет свыше 3500 водотоков различной протяжённости, из них 30 крупных рек. В стране около 2000 озёр, самое большое и глубокое из которых — Иссык-Куль (Сафонова, 2009). Наиболее крупными реками по величине площади водосбора являются реки Нарын, Карадарья, Тарим, Чу, Талас и Чаткал. Река Нарын существенно влияет на хозяйственную деятельность соседних стран — Узбекистана, Казахстана и Таджикистана. Длина реки составляет 535 км, площадь бассейна — 53 тыс. км², сток реки колеблется в пределах 10–14 км³ в год; Сливаясь за пределами Кыргызстана с р. Карадарья, р. Нарын образует Сырдарью (Служба водных ресурсов Кыргызской Республики, 2023).

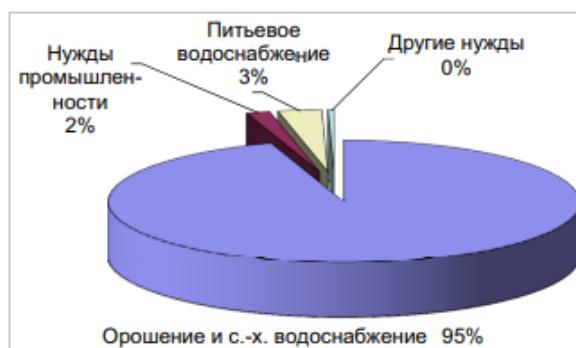


Рисунок 2.1.2. Виды использования воды в Кыргызстане (Источник: Осмонбетова, 2021)

По распределению речного стока на 1 км² наиболее обеспеченной является Нарынская область — 299 тыс. м³ на км², за ней следуют Иссык-Кульская, Ошская, Джалал-Абадская и Чуйская области (Осмонбетова, 2021). Наименее обеспечены водой Баткенская (115 тыс. м³ на км²) и Таласская (162 тыс. м³ на км²) (Осмонбетова, 2021) области. Суммарный среднегодовой сток рек на территории Кыргызстана составляет 47,2 км³, в том числе в вегетационный период — 35 км³ (74 %), а в осенне-зимний и ранневесенний периоды — 12,2 км³ (26 %) (Осмонбетова, 2021; Малышев, 1997). В самом Кыргызстане используется 20–25% от всего стока, остальная вода служит важным водным ресурсом для соседних стран. Пресная вода в стране расходуется на орошение и другие сельскохозяйственное водоснабжение (почти 95 %), нужды промышленности (1,6 %), хозяйствственно-питьевое водоснабжение (более 3 %) (рис. 2.1.2). Вода для орошения поступает в основном из речного стока (80 %) и частично из водохранилищ (13 %), а питьевое водоснабжение осуществляется в основном за счёт подземных вод (FAO, 2016). Большая часть поверхностных и подземных вод питается за счёт криосферы (Hill et al., 2017).

Таджикистан. Таджикистан обладает богатыми водными ресурсами и занимает ключевое место в качестве «водонапорной башни» в Центральной Азии. Основу водных ресурсов Таджикистана составляют ледники. Количество ледников достигает более 14,5 тыс. с общей площадью оледенения 11 146 км², что занимает 8 % территории страны (Gafforzoda et al., 2023).

По территории страны протекает около 947 рек, общая длина которых превышает 28,5 тыс. км, но наиболее важными являются Сырдарья, Пяндж, Вахш, Мургоб, Кофарнихон, Сурхоб, Оксу, Зерафшан. В стране насчитывается более 1300 озёр (одно из крупнейших — Сarezское). Озёра Таджикистана содержат более 46,3 км³ воды, из которых 20 км³ — пресные. В стране имеется 10 водохранилищ (Нурекское, Кайраккумское и др.) общим объёмом 15 км³. Основными водопользователями в Таджикистане являются питьевое водоснабжение и санитария, гидроэнергетика, орошающее земледелие, промышленность, рыбное хозяйство, рекреация и окружающая среда. Таджикистан фактически использует всего 17–20 % формирующихся на его территории водных ресурсов (Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан).

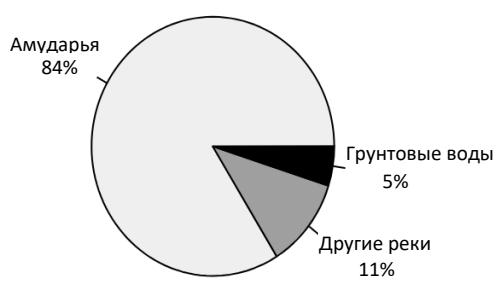
84 % воды в Таджикистане используется в сельском хозяйстве, 8,5 % потребления приходится на питьевое водоснабжение и коммунальное хозяйство, 4,5 % — на промышленность и 3 % — на другие нужды (Toderich et al., 2004). Ежегодно в Таджикистане формируется около 64 км³ воды, что составляет около 55 % от общего стока в бассейне Аральского моря (Toderich et al., 2004).

Туркменистан. Основным источником воды для Туркменистана является река Амударья. Амударья считается международным водным ресурсом, и её использование контролируется многосторонними соглашениями, по которым Туркменистану выделяется 22 млрд км³ воды в год. Забор воды из Амударьи составляет почти 90 % и дополняется поверхностным стоком трёх других рек: Мургаб, Теджен и Атрек, а также незначительными объёмами из малых рек Восточного и Центрального Копетдага. Строительство Каракумского канала, начатое в 1954 году и завершённое в 1988 году, изменило водный ландшафт Туркменистана, поставляя 13 км³ воды в год из реки Амударья в пустыню Каракумы. Этот канал, несмотря на открытие новых сельскохозяйственных угодий, особенно для монокультуры хлопка, приводит к значительным потерям воды и повсеместному засолению почв (Glantz, 1999; Saiko and Zonn, 2000). На территории Туркменистана практически отсутствует поверхностный сток, и водная безопасность страны в значительной степени зависит от водных ресурсов и управления ими соседних стран (Li et al., 2017; Malsy et al., 2012; Sorg et al., 2012). Эпизодический сток после дождя может происходить только в некоторых местах, образованных такырами и такыроподобными почвами (Orlovsky & Orlovsky, 2002). Годовое количество осадков в Туркменистане колеблется от 100 до 400 мм (Orlovsky & Orlovsky, 2014). Подземные воды играют незначительную роль в водных ресурсах

Туркменистана. Общие запасы подземных вод достигают $3,4 \text{ км}^3$, из которых только $1,3 \text{ км}^3$ пригодны для использования (Stanchin & Lerman, 2007).

На долю сельского хозяйства приходится более 90 % водопотребления в Туркменистане. На промышленность приходится 3 %, на коммунальное хозяйство — 2,7 %, на животноводческие комплексы и орошение пастбищ — 0,6 %, а на рыбное хозяйство — 0,1 % (Zonn, 2012). Вода доходит до конечного потребителя через сложную систему магистральных (главных) каналов, которые берут воду из рек, распределительных (второстепенных) каналов, которые распределяют воду между крупными фермерскими хозяйствами по всей стране, и каналов третьего порядка, которые распределяют воду между фермерами внутри крупных хозяйств. Распределение воды по различным направлениям использования (включая системные потери) показано на рисунке 2.1.3 (Stanchin & Lerman, 2007). Туркменистан сталкивается с серьёзными проблемами в области водных ресурсов, их использования и сохранения, учитывая растущее антропогенное воздействие на водные объекты. В будущем в стране ожидается повышенное потребление воды, обусловленное ускорением темпов экономического развития и расширением производственных мощностей в различных отраслях (Zonn, 2012). В контексте Туркменистана благополучие и безопасность страны зависят от динамичного взаимодействия внутренних и внешних факторов, включающих изменчивость климата, институциональные изменения, трансформацию регионального землепользования и более широкие процессы интернационализации и глобализации экономики.

Структура водных ресурсов
Туркменистана



Структура водопользования (2004)

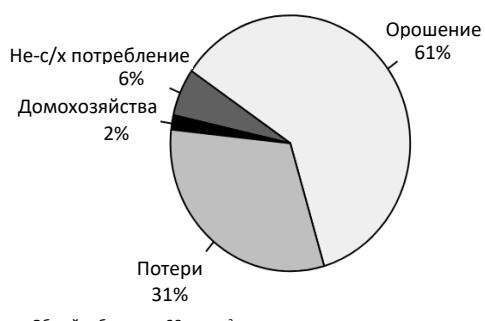


Рисунок 2.1.3. (Слева) виды водных ресурсов; (справа) основные потребители водных ресурсов Туркменистана (Источник: Stanchin & Lerman, 2007).

Узбекистан. Основными водными ресурсами Узбекистана являются реки Амударья и Сырдарья. Узбекистан использует около 90 % имеющихся водных ресурсов в основном в вегетационный период. В межсезонье пресная вода используется для орошения зимних культур, пополнения влаги и промывки засоленных почв. В горах насчитывается 411 ледников общей площадью 190 км^2 , которые служат долговременными хранилищами воды (Жумаева, 2021). Крупнейшие из них — Баркрак, Калесника и Пахтакор. Дополнительным, но довольно незначительным источником воды является эксплуатация запасов подземных вод и повторное использование коллекторно-дренажного стока (табл. 2.1.3).

Таблица 2.1.3. Распределение водных ресурсов по источникам водозабора в 2014 году (Источник: Государственный водный кадастр Республики Узбекистан, 2014)

Бассейны рек	Водозабор по источникам, км^3 в год				
	Всего	в том числе			
		из основных рек	из малых рек	из подземных вод	из коллекторов
р. Амударья	33,66	21,07	8,59	1,67	0,68
р. Сырдарья	24,98	11,06	9,26	3,65	0,66

Всего	56,64	32,13	17,85	5,32	1,34
--------------	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------

В современных условиях в распоряжении Узбекистана находится в среднем 11,5 км³ в год поверхностного стока внутренних рек, 42,0 км³ в год трансграничных рек и 9,43 км³ в год возвратных и подземных вод. В общем объёме водопотребления доля ирригации в среднем за период 1996–2013 гг. составила 86 %, доля энергетики — 8 %, доля питьевого и коммунального водоснабжения — около 4 % (рис. 2.1.4).

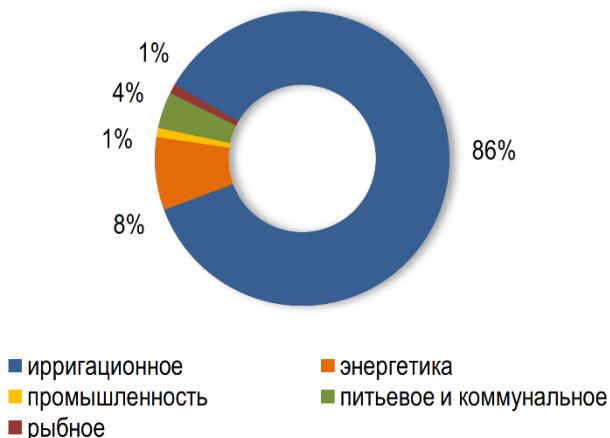


Рисунок 2.1.4. Водопотребление по отраслям экономики Узбекистана за период 2004–2013 гг.
(Источник: Государственный водный кадастр Узбекистана, 2014)

2.2. 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 (МГЭИК) (ОД6)). Туркменистан и Узбекистан являются наиболее остро испытывающими нехватку воды странами региона (Kartje et al., 2017; Russell, 2018), при этом 88 % поверхностных вод Туркменистана поступает из Амударьи, протекающей по его границе из Таджикистана и через Афганистан (Определляемый 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). Льды и таяние снега являются основными водными ресурсами для густонаселённых низменностей Центральной Азии (Konovalov & Shchetinnicov, 1994; Schaner et al., 2012; Chen et al., 2016) и играют важнейшую роль в жизни населения горных районов (рис. 2.2.1) (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. Ледники и многолетняя мерзлота сбрасывают большую часть талой воды в период с июля по

сентябрь. Изменения в состоянии снежного покрова, ледников и многолетней мерзлоты, вызванные повышением температуры воздуха, оказывают значительное влияние на эти водные ресурсы. Для лучшего понимания ситуации в связи с изменением климата, необходим долгосрочный мониторинг компонентов криосферы. Это поможет лучше количественно оценить связанные с этим изменения вклада талых вод в сток (Barandun et al., 2020). В настоящее время ежегодный вклад ледниковых талых вод с гор Тянь-Шаня в верхнее течение Сырдарьи составляет 10 % в год. Вклад талых ледниковых вод в Амударью составляет около 40 % в год (рис. 2.2.1). Однако в засушливые летние месяцы вклад талых вод ледников может резко возрасти до 42 % для Сырдарьи и до 96 % для Амударьи (Huss & Hock, 2018). Согласно прогнозам, к 2050 году поверхностный сток Амударьи в летние месяцы увеличится на 25 % из-за усиления таяния ледников, а затем снизится примерно на 28 % к концу столетия. Модели прогнозируют аналогичное увеличение стока для Сырдарьи в июле и августе. Будущее сокращение количества твёрдых осадков в первую очередь скажется на весеннем и раннелетнем стоке.

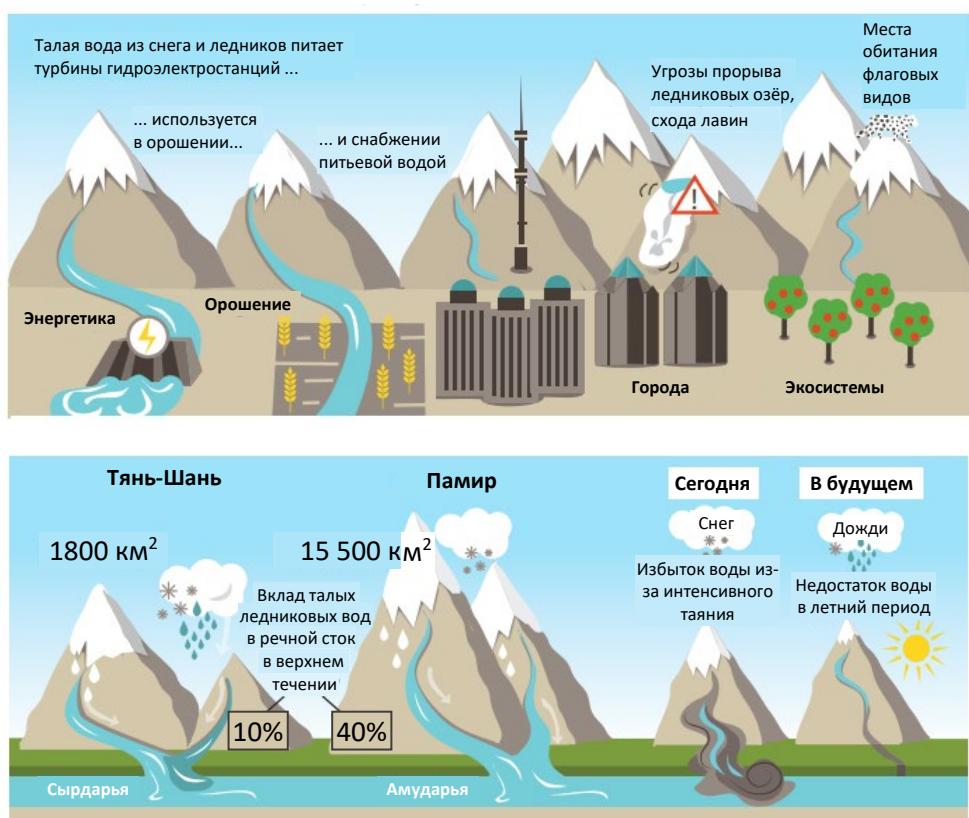


Рисунок 2.2.1. (Вверху) основные виды водопользования с зависимостью от криосферы в Центральной Азии, и (внизу) водные ресурсы, хранящиеся в криосфере Центральной Азии сегодня и ожидаемые изменения в будущем (Источник: Zoï Environment Network, Женева)

Усилятся как экстремальные наводнения, так и экстремальные засухи, а также общая нехватка воды. Изменения в сезонности снежного покрова, влекущие более раннее таяние, могут привести к увеличению весеннего и летнего стока в малоснежные годы или засухи (Siegfried et al., 2012). Это может спровоцировать наводнения, связанные с прорывом ледниковых озёр, селевые потоки и оползни, которые могут нанести ущерб близлежащим населённым пунктам. Когда многолетняя мерзлота оттаивает в ответ на повышение температуры воздуха, она возвращается в климатическую систему, высвобождая запертый метан или углекислый газ. В результате усиливается парниковый эффект (Koven et al., 2011).

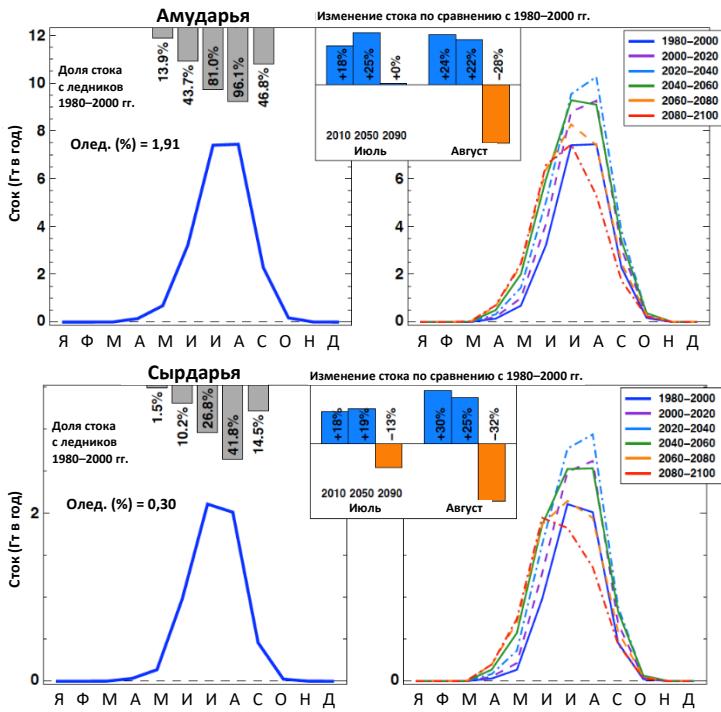


Рисунок 2.2.2. (Слева) текущий и (справа) будущий месячный ледниковый сток для двух главных рек Центральной Азии (Huss & Hock, 2018)

2.3. Проблемы, связанные с водными ресурсами

Совокупный эффект от изменения климата будет очень значительным. Повышение температуры уже приводит к более раннему таянию снега, увеличению потребности в воде и сокращению сезона орошения. В сочетании с изменениями вклада талых вод со стороны криосферы следует ожидать серьёзных перемен. Усилятся как экстремальные наводнения, так и экстремальные засухи, а также общая нехватка воды (Sara & Proskuryakova, 2022). Потенциальной угрозой для региона является нерегулируемое использование воды, в основном для орошения сельскохозяйственных угодий. Кроме того, вода является основным источником электроэнергии, вырабатываемой на гидроэлектростанциях (Schrader et al., 2019). Бесперебойное снабжение населения электроэнергией зависит от уровня водохранилищ, ёмкость которых уменьшается в связи с продолжающимся изменением климата.

Все страны Центральной Азии связаны общими водными объектами и в совокупности сталкиваются с серьёзными водными проблемами. Быстрый рост численности и плотности населения привёл к увеличению потребности в воде (Mankin et al., 2015). Трансграничный аспект водных ресурсов, неравномерное распределение и забор воды на протяжении реки создают проблему управления водными ресурсами в регионе (Munia et al., 2016; Krasznai et al., 2019). Конкуренция и конфликты из-за воды между различными водопользователями также возрастают. По данным Кассара и соавторов (Cassara et al., 2019), в Центральной Азии существуют различные проблемы, связанные с водными ресурсами, особенно в отношении систем управления водными ресурсами. Одной из проблем является раздробленность системы управления водными ресурсами между различными министерствами и ведомствами с большим числом ответственных структур. Другой проблемой является реализация водных реформ в странах Центральной Азии. Правовая база для реформирования водохозяйственного сектора уже создана и регулярно обновляется. Однако реализация реформ представляет собой сложную задачу. Среди проблем — пробелы в национальных стратегиях, отсутствие эффективных систем информации и сетей мониторинга, отсутствие научно-технического потенциала у сотрудников учреждений, недостаточная мобилизация государственных бюджетов, слабая координация и

информирование. Недостаточное внимание уделяется вопросам охраны окружающей среды и здоровья, что приводит к сокращению инвестиций в инфраструктуру и техническое обслуживание, а также к ухудшению состояния сетей мониторинга водных ресурсов и окружающей среды (Cassara et al., 2019). Нерациональное использование удобрений и пестицидов ухудшило качество поверхностных и подземных вод из-за повышенного засоления и химического загрязнения почвы, что негативно сказывается на здоровье людей, экосистемах и продуктивности сельского хозяйства (Cassara et al., 2019; Бектурганов и соавт., 2016). До последних лет вопросам качества подземных вод уделялось меньше внимания, чем вопросам количества поверхностных вод (Cassara et al., 2019). Значительное потребление воды населением Центральной Азии для орошения влаголюбивых культур, таких как хлопок и рис, привело к истощению ирригационных возможностей рек Амударья и Сырдарья. Неконтролируемое использование водных ресурсов рек привело к экологической катастрофе — высыханию Аральского моря. В 2014 году полностью высохла восточная часть Южного (Большого) Аральского моря. В настоящее время страны Центральной Азии являются одними из самых высоких потребителей воды на душу населения в мире (Dukhovny & Schutter, 2011). Большая часть воды используется для орошения, в то время как доля сельского хозяйства в валовом внутреннем продукте (ВВП) Центральной Азии сократилась почти вдвое с момента распада Советского Союза (Hamidov et al., 2016). Изменения в структуре водоснабжения в сочетании с быстрым ростом и индустриализацией экономики приводят к увеличению риска нехватки воды в регионе. Большинство стран региона регулярно сталкиваются с засухами. Недостаток воды сказывается на состоянии пахотных земель, что приводит к снижению урожайности пшеницы и других культур и способствует распространению вредителей и болезней. Человеческая деятельность также может усугубить ситуацию, оказывая негативное воздействие, такое как, например, нерегулируемый выпас скота, вырубка лесных массивов и неэффективное ведение земледелия. В сочетании с изменением климата это может значительно усилить процессы эрозии и деградации почв. Более жаркая погода и увеличение числа жарких дней будут приводить к увеличению опустынивания, снижению продуктивности пастбищ и сокращению кормовой базы. Все эти процессы могут влиять на продовольственную безопасность региона (Идрисов, 2023).

Загрязнение вод Центральной Азии происходит из-за развития промышленности, увеличения численности и плотности населения, использования дешёвых удобрений и пестицидов, попадания пестицидов в реки с плохо оборудованных складов, а также наличия урановых рудников и хранилищ. С бытовыми и сельскохозяйственными стоками поступают биологические загрязнители, такие как бактерии, гельминты, вирусы, а в результате промышленной деятельности — также и токсичные металлы (Сафонова, 2009). Дополнительную угрозу представляет крупнейшее хвостохранилище токсичных отходов золотодобывающего комбината на Тянь-Шане, где быстро тающий ледник Петрова может разрушить дамбу, и содержимое хранилища попадёт в реки Арабель и Нарын — важные водные источники.

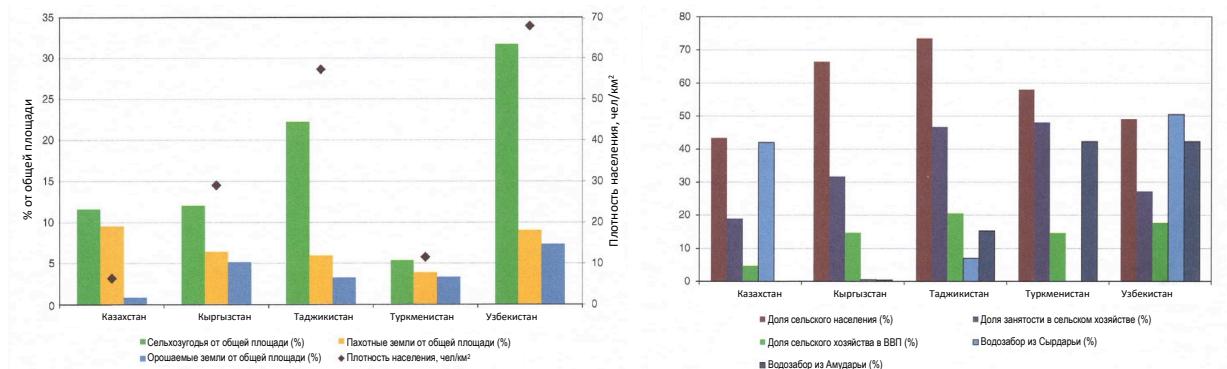


Рисунок 2.3.1. (Слева) важность сельскохозяйственных земель в Центральной Азии, (справа) пропорциональное представление сельскохозяйственных, пахотных и орошаемых земель, а также вклада сельского хозяйства в ВВП для каждой страны Центральной Азии (Murzakulova et al., 2019)

Экстремальные погодные явления, вызванные влиянием изменения климата, в настоящее время представляют собой серьёзную угрозу для населения. Большая часть наблюдаемых чрезвычайных ситуаций, таких как град, селевые паводки, прорыв ледниковых озёр, засуха, экстремально высокие или низкие температуры, вызвана экстремальными погодными явлениями. Стихийные бедствия разрушают транспортную, энергетическую и другую инфраструктуру и наносят урон сельскому хозяйству. В 2021 году засуха привела к гибели нескольких тысяч животных в ряде областей Казахстана, а нехватка воды для орошения вызвала протесты фермеров в Чуйской области Киргизстана. Весной 2022 года сильные ливни в Таджикистане и Киргизстане стали причиной селевых потоков, которые нанесли значительный ущерб в некоторых районах стран (Идрисов, 2023). В условиях продолжающегося изменения климата подобные явления будут происходить всё чаще.

Заключение

Вода играет важнейшую роль в социально-экономическом развитии Центрально-Азиатского региона. 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.

Изменение климата оказывает кумулятивное воздействие на водные ресурсы региона: повышается температура воздуха и изменяется характер осадков. Это создаёт такие риски, как усиление дефицита воды, изменение сезонности снежного покрова и возможность экстремальных погодных явлений. 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.

Социально-экономическое развитие стран Центральной Азии тесно связано с наличием водных ресурсов. Регион сталкивается с растущей потребностью в воде в связи с ростом населения и экономическим развитием, что приводит к потенциальным конфликтам из-за водных ресурсов. Решение этих проблем требует не только проведения эффективных мер политики, но и международного сотрудничества для обеспечения устойчивого и справедливого водопользования.

Учитывая ожидаемые изменения водообеспеченности в связи с изменением климата, необходимы совместные инициативы по адаптации и смягчению последствий. Сюда входит улучшение мониторинга криосферы, а также достижение более глубокого понимания динамики криосферы в прошлом для лучшего прогнозирования будущих изменений и связанных с ними последствий для водных ресурсов.

ГЛАВА 3. ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

3.1. Климатическая обстановка в Центральной Азии

Гавхар Мамаджанова^{a,b}

^a Редингский университет, Рединг, RG6 6АН, Великобритания

^b Научно-исследовательский гидрометеорологический институт центра гидрометеорологической службы Республики Узбекистан (Узгидромет), Ташкент, 100052, Узбекистан

Расположенный в глубине Евразийского континента и вдали от океана регион Центральной Азии, включающий в себя пять стран (Казахстан, Кыргызстан, Таджикистан, Туркменистан и Узбекистан), характеризуется засушливым и полузасушливым климатом с жарким и сухим летом и холодной зимой, иногда суровой, со снегопадами. Рельеф региона сложный, высота колеблется от менее 134 м над уровнем моря в западном Казахстане до более 7000 м над уровнем моря в юго-восточных странах — Кыргызстане и Таджикистане (хребты Тянь-Шаня и Памира). Средняя температура воздуха в январе на юге умеренная, на севере от 0 °C до -17 °C, а в экстремально холодные годы может быть ниже -54 °C на востоке Казахстана¹ и -63 °C в районе озера Булункуль на Памире в Таджикистане². Средняя температура воздуха в июле колеблется от 25 °C на большей части региона до 30 °C на юге и в пустынных районах, что делает его самым жарким месяцем в году. Максимальные значения могут достигать 45 °C в южной части Центральной Азии с рекордной температурой 50 °C в Термезе и пустыне Кызылкум (Чуб, 2007).

Среднегодовое распределение осадков в Центральной Азии характеризуется наличием значительного контраста между равнинами с преобладанием степей, пустынь и полупустынь на большей части региона (>250 мм), предгорьями (250–500 мм) и горными районами (до 2000 мм на некоторых наветренных склонах) на востоке и юго-востоке Центральной Азии (Чуб, 2007). Западные и северо-западные равнины региона открыты для воздушных потоков, приходящих с севера и северо-запада, и западного влажного воздуха из Атлантики; в то же время юго-западный влажный воздух из районов Средиземного и Арабского морей достигает региона, когда струйное течение перемещается на юг Центральной Азии (Schiemann et al., 2008).

Почти 80 миллионов человек в пяти странах Центральной Азии³ зависят от водных ресурсов, образующихся в этом регионе, где на уходящих в небо горных хребтах расположено более 25 тыс. ледников (Barandun et al., 2020). Ледники вносят значительный вклад в среднегодовой и особенно летний сток двух основных трансграничных рек, Амударьи и Сырдарьи, и являются основными индикаторами климатических изменений (Kriegel et al., 2013). Однако горы Центральной Азии чувствительны к глобальному потеплению из-за огромных запасов водных ресурсов в виде ледников и снега на больших высотах (Xenarios et al., 2019). По данным Шестого оценочного доклада МГЭИК (ОД6)⁴, ледники могут исчезнуть почти на 70 % в Центральной и Западной Азии, где годовой сток в крупных ледниковых водосборах, по прогнозам, сократится более чем на 10 %, причём наиболее значительное сокращение произойдёт в Центральной Азии к концу XXI века.

Во многих исследованиях оценивается эффективность глобальных климатических моделей [также называемых моделями общей циркуляции, сокращённо ГКМ и МОЦ – прим. перев.] в имитации

¹ Казгидромет: <https://www.kazhydromet.kz/>

² Четвёртое национальное сообщение Республики Таджикистан по РКИК ООН, 2022: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/4NC_TJK_ru_0.pdf

³ По данным Worldometer: <https://www.worldometers.info/world-population/central-asia-population>

⁴ Шестой оценочный доклад МГЭИК «Изменение климата в 2022 году: последствия, адаптация и уязвимость» [только на англ.]: https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf

поверхностных температур и характеристик осадков, оказывающих значительное влияние на гидрологический цикл над регионом Центральной Азии. Например, результаты влияния изменения климата на сезонную изменчивость осадков и температуры над Центральной Азией в рамках Скоординированного эксперимента по даунскейлингу региональных климатических моделей (CORDEX) показывают относительно высокую тенденцию потепления приземной температуры воздуха (в среднем от 3 °C до 11,4 °C) и уменьшение осадков, особенно в юго-восточной части региона к концу века в 2070–2100 гг. (Ozturk et al., 2012, Ozturk et al., 2017). Разукрупнение сценария выбросов региональной климатической модели высокого разрешения указывает на потепление до 7 °C в северной части Центральной Азии и горных районах до конца XXI века (Mannig et al., 2013). Однако сценарии изменения климата прогнозируют установление более сухих летних условий на большой территории Центральной Азии и более влажных холодных сезонов в северной части региона. Хуанг и соавт. (Huang et al., 2014) спрогнозировали будущее изменение годового количества осадков над Центральной Азией на период 2011–2100 гг. с использованием МОЦ CMIP5 в рамках различных сценариев выбросов (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5). Авторы обнаружили тенденции к увеличению годового количества осадков (более 3–9 мм за десятилетие) для северной части Центральной Азии, гор Тянь-Шань и северного Тибета к концу 2100 года по сравнению с предыдущими исследованиями сигналов изменения климата над Центральной Азией. Авторы предположили, что возможными механизмами увеличения изменений прогнозируемых осадков могут быть крупномасштабные потоки водяного пара в атмосфере и поверхностное испарение над исследуемым регионом. Дайк и соавторы (Dike et al., 2022) исследовали пространственное распределение и изменчивость осадков в рамках сценариев общих социально-экономических путей (SSP) в МОЦ CMIP6, и модели предсказали уменьшение общего количества осадков в весенние дни с осадками на юге Центральной Азии и значительное его увеличение в северной части региона.

Помимо этих исследований, было проведено относительно мало изысканий, посвящённых прогнозируемым изменениям крупномасштабной атмосферной циркуляции как основного фактора экстремальных осадков и источника водных ресурсов над Центральной Азией в условиях глобального потепления. Чжао и соавторы (Zhao et al., 2018) смоделировали субтропическое западное струйное течение (СЗСТ) и его влияние на прогнозируемые режимы осадков над Центральной Азией для летних сезонов 2071–2100 гг. с помощью 25 моделей CMIP5. Применив метод эмпирических ортогональных функций, авторы выявили силу и положение СЗСТ над Центральной Азией в будущем. Согласно результатам ансамбля CMIP5, ось СЗСТ смещается дальше на юг над Центральной Азией, что приведёт к увеличению количества летних осадков в большинстве северных и северо-восточных районов региона в будущем, однако авторы обнаружили неопределенность в отношении будущих изменений режима осадков в остальной части Центральной Азии. Рейер и соавторы (Reyer et al., 2013) изучили связь между погодной системой и частотой осадков и их величиной для бассейна реки Аксу в Центральной Азии и спрогнозировали изменения климатологии осадков в бассейне Аксу до 2100 года. Результаты статистико-динамического подхода показывают уменьшение годового количества осадков на значительной части бассейна реки Аксу в Тянь-Шане и, наоборот, их увеличение — к юго-востоку от района исследования.

В некоторых исследованиях оценивается негативное влияние глобального потепления на ледниковые зоны Центральной Азии и его отрицательные последствия для водообеспеченности региона (Barandun et al., 2020). Исследователи прогнозируют значительное сокращение ледников из-за повышения температуры воздуха над Тянь-Шанем и Памиром, считающимися «водонапорными башнями» Центральной Азии, и его влияние на доступность воды до конца столетия (Sorg et al., 2015, Kure et al., 2013). Используя последние достижения в области климатического моделирования, Малси и соавторы (Malsy et al., 2012), Уайт и соавт. (White et al., 2014) и Радченко и соавторы (Радченко и соавт., 2017) исследовали влияние изменения климата на водные ресурсы в Центральной Азии и определили, что

дефицит воды в регионе может увеличиться. Более того, неопределенность относительно наличия водных ресурсов в контексте меняющегося климата создаёт серьёзный риск для сельского хозяйства, продовольственной безопасности и безопасности питания, а также средств к существованию миллиона людей в Центральной Азии (Sommer et al., 2013; Bobojonov & Aw-Hassan, 2014; Hagg et al., 2013).

В целом, регион Центральной Азии серьёзно подвержен влиянию глобального потепления, о чём свидетельствуют отступление ледников, дефицит воды и усиление опустынивания, которые могут оказать существенное воздействие на общество и экосистемы. Тем не менее, антропогенное изменение климата будет способствовать обострению проблемы криосферных водных ресурсов, уменьшению снежного покрова и таянию многолетней мерзлоты, которые угрожают населению низовьев Центральной Азии через изменение гидрологического режима и увеличение вероятности оползней и наводнений, связанных с прорывом ледниковых озёр. Развитие потенциала и распространение знаний на различных уровнях, создание долгосрочных и устойчивых сетей мониторинга криосферы, улучшение методов управления водными ресурсами и поддержка устойчивого регионального сотрудничества в водном секторе могут сделать процессы и результаты управления климатическими рисками более эффективными во всей Центральной Азии.

3.2. Изменение климата в Казахстане

Замира Усманова^a, Василий Капица^a, Зарина Сайдалиева^a, Мартина Барандун^b

^a Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан

^b Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

Климат Казахстана из-за большой удалённости от океана резко континентальный с продолжительным жарким летом и холодной зимой, с большими суточными и годовыми колебаниями температуры воздуха. Максимум среднего по территории количества осадков приходится на период с апреля по июль, минимум — на август-сентябрь. Годовое количество осадков колеблется от менее 100 мм в некоторых крайних юго-западных и южных районах пустынной зоны до 1500 мм и более в предгорных и горных районах (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022).

Сведения об изменении климата в прошлом

Согласно результатам оценки изменений среднемесячных температур воздуха и месячных сумм осадков, в Казахстане наблюдается повсеместное повышение как средних годовых температур воздуха, так и средних сезонных температур. С 1960-х годов на территории Казахстана каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего. С середины 1970-х годов наблюдались в основном положительные аномалии средней годовой и средней сезонной температуры приземного воздуха (Ежегодный бюллетень, 2022; 8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022; Karataev et al., 2022; Salnikov et al., 2015).

Сравнение средних многолетних значений температуры воздуха за два последовательных периода 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг. указывает, что в среднем по территории республики средняя годовая температура повысилась на 0,9 °C (рис. 3.2.1). Значительнее всего потеплели февраль и март — на 2,0 и 1,7 °C, соответственно. Мало изменилась температура июля и декабря. Среднее по территории годовое количество осадков практически не изменилось (рис. 3.2.1), но в отдельные месяцы оно увеличилось — максимально в феврале (на 15,6 %), при этом в сентябре и октябре количество осадков уменьшилось на 10,8 % и 14,8 % соответственно (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022).

Годовое количество осадков в среднем по территории Казахстана убывало в 1960-х и 1970-х годах, в последний 46-летний период (1976–2021 гг.) долгопериодные тенденции отсутствовали, наблюдалось лишь чередование коротких периодов с положительными и отрицательными аномалиями количества осадков (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН; Ежегодный бюллетень, 2022; Karatayev et al., 2022; Salnikov et al., 2015).

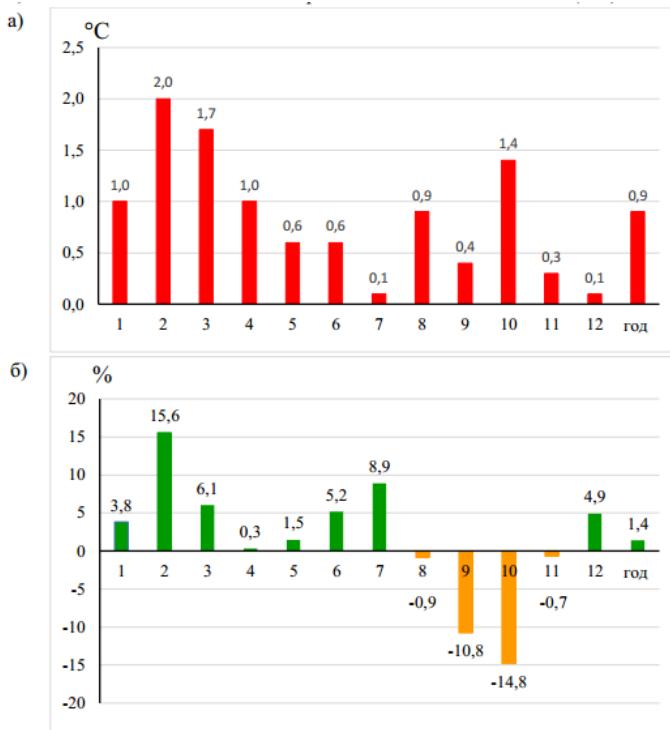


Рисунок 3.2.1. Изменение температуры воздуха (а) и количества осадков (б), осреднённых по территории Казахстана. Изменения температуры рассчитаны как разность между средними многолетними значениями за период 1991–2020 гг. и за период 1961–1990 гг. (в °C), для осадков — как отношение средних многолетних значений (в %) (Источник: 8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022).

Большинство исследований проводилось на равнинах и в предгорьях страны; недостаток и отсутствие гидрометеорологических станций в горных и особенно высокогорных районах затрудняют достоверную оценку изменений климата (Пивень, 2008, 2013). В ледниково-нивальной зоне Заилийского Алатау по данным метеостанций Тюксу-1, Мынжилки, Большое Алматинское озеро отмечено повышение средней годовой и средней сезонной температуры воздуха (Вилесов, 2007; Пивень, 2008, 2013; Shahgedanova et al., 2018; Kapitsa et al., 2020) — скорость повышения летней температуры составила 0,03 °C в год за период 1957–2016 гг. Шахгеданова и соавторы (Shahgedanova et al., 2018), Капица и соавторы (Kapitsa et al., 2020), Пивень (Пивень, 2013), Вилесов и Уваров (Вилесов и Уваров, 1997) сообщают, что с 1970-х годов летние температуры воздуха растут более интенсивно, наблюдается повышение зимних температур и увеличение продолжительности тёплого периода за счёт повышения температуры осеннего сезона.

Высотные метеорологические станции с непрерывным рядом наблюдений в Жетысуском (Джунгарском) Алатау и Казахстанском Алтае отсутствуют (Kapitsa et al., 2017; Bolatova et al., 2023). Однако на различных станциях, расположенных в Жетысуском Алатау между 600 и 1700 м над уровнем моря, были выявлены значительные положительные тренды температуры воздуха для всех сезонов года, включая летний сезон аблации. С 1960 по 2014 год летние температуры на региональных станциях в Жетысуском Алатау

увеличивались со скоростью 0,18 °C/10 лет (Kapitsa et al., 2017). Аналогичное повышение температуры воздуха наблюдается и на Казахстанском Алтае (Bolatova et al., 2023).

В Заилийском Алатау, Жетысуском Алатау и на Казахстанском Алтае не выявлено долгосрочных трендов в изменении количества как сезонных, так и годовых осадков; в последние десятилетия выявлено некоторое (незначительное) увеличение как сезонных, так и годовых осадков (Пивень, 2008, 2013; Shahgedanova et al., 2018; Kapitsa et al., 2017; Kapitsa et al., 2020; Bolatova et al., 2023); наблюдаемая отрицательная аномалия регионального количества осадков в 1970–1990-е годы (Северский и соавт., 2006; Северский и соавт., 2016; Shahgedanova et al., 2018; Kapitsa et al., 2020) вместе с повышением летней температуры повлияла на баланс массы ледников Тянь-Шаня (Farinotti et al. 2015), что было связано с изменениями атмосферной циркуляции (Cao, 1998; Shahgedanova et al., 2018). Аналогичные тенденции изменчивости климата обнаружены для всего Тянь-Шаня (Aizen et al., 1996; Kutuzov & Shahgedanova, 2009; Narama et al., 2010; Wang et al., 2013; Unger-Shayesteh et al., 2013; Gan et al., 2015).

Ожидаемые изменения климата в будущем

Ожидается, что температура приземного воздуха будет продолжать расти во все сезоны, и если к середине столетия диапазон изменения составляет 2,3–2,6 °C по сценарию SSP2-4,5 и 3,0–3,5 °C по сценарию SSP5-8,5, то к концу века можно ожидать ещё более значительного потепления (на 3,3–3,9 °C и 6,2–7,3 °C соответственно).

В соответствии с траекторией самых высоких выбросов (SSP5-8,5) прогнозируется, что к концу века средняя годовая температура в Казахстане повысится более чем на 6 °C, что примерно на 3 °C больше, чем при сценарии с более низким уровнем выбросов (SSP2-4,5), что указывает на большую разницу в потеплении на территории Казахстана, которая может быть достигнута за счёт контроля над глобальными выбросами. Темпы повышения средней и сезонной годовой температуры не одинаковы по Казахстану — в северных регионах ожидается более значительное потепление. Ансамбль моделей предполагает, что вероятность периодов сильной жары может значительно увеличиться в XXI веке, особенно при высоких сценариях выбросов (SSP5-8,5) (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022).

Согласно 8-му национальному сообщению Республики Казахстан по РКИК ООН от 2022 года, большинство моделей климата прогнозируют некоторое увеличение годового количества осадков на территории Казахстана. К середине текущего века это увеличение в среднем по Казахстану составит 7–8 % в зависимости от сценария выбросов парниковых газов. К концу века оно может достигнуть 11–14 %. По территории страны изменение в годовых суммах осадков неравномерно, минимальное увеличение менее чем на 10 % ожидается на западе Казахстана, максимальное увеличение чуть более чем на 20 % ожидается на юго-востоке страны. Наибольшее увеличение среднего по Казахстану сезонного количества осадков можно ожидать в зимний период — к концу века на 20–35 %, весной на 13–16 %, осенью примерно на 7 %. В летний период ожидается неблагоприятный сценарий — в среднем по Казахстану уменьшение осадков на 12 %. Интенсивность экстремальных осадков, по-видимому, увеличится с повышением температуры — этот вывод подтверждается данными из различных регионов Азии. Однако это явление сильно зависит от локальных географических условий (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022).

Влияние изменения климата на обеспеченность водой

Несмотря на наблюдаемое сокращение площади ледников, значительного уменьшения стока в Северном Тянь-Шане и Жетысуском Алатау с 1950-х годов не наблюдается. В связи с повышением температуры воздуха наблюдаются внутригодовые изменения (перераспределение) стока: осенью и зимой сток увеличивается в Северном Тянь-Шане за счёт увеличения продолжительности сезона таяния

до начала осени; увеличение стока рек Жетысуского Алатау в зимние месяцы связано с увеличением частоты зимних оттепелей (Shahgedanova et al., 2018; Issaldayeva et al., 2023).

Согласно прогнозам, при текущем уровне потепления климата и незначительном изменении количества осадков ледники потеряют половину своего объёма и треть площади к концу XXI века, но не исчезнут полностью (Shahgedanova et al., 2018). Влияние прогнозируемого изменения климата на речной сток зависит от степени оледенения водосбора. Однако при существующих знаниях неопределенность климатических сценариев и ограниченное понимание возможных механизмов ответной реакции климата делают прогнозы весьма неопределенными. Регионы с низкой степенью оледенения (в настоящее время 2–4 %) (водосборные бассейны Тургень, Каскелен) будут уязвимы, поскольку ожидается, что летний сток сократится на 20–37 %, особенно при более пессимистичных сценариях. На водосборах с высокой степенью оледенения (реки Большая Алматинка, Талгар) статистически значимых изменений летнего стока не выявлено, а весенний сток увеличивается при пессимистических сценариях (Shahgedanova et al., 2020). На водосборах со средней степенью оледенения (10–12 %, Малая Алматинка) при менее пессимистичных сценариях прогнозируется уменьшение летнего стока, а при наиболее сильном потеплении более интенсивное таяние ледников и снега будет обеспечивать приток воды (Shahgedanova et al., 2020). После пика водности вклад таяния ледников будет уменьшаться, а таяние снега станет доминирующим по вкладу (Kaser et al., 2010).

В результате прогнозирования климатических параметров и стока рек выбранных участков водохозяйственных бассейнов, во всех водохозяйственных бассейнах ожидается повышение температуры воздуха, а также повышение сумм осадков в разной степени в зависимости от бассейна (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022). Повышение температуры влияет на режим таяния ледников, и сток воды будет увеличиваться до середины века в результате интенсивного таяния ледников и сократится к концу века ввиду истощения ледников (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022). В частности, такая тенденция изменения стока характерна для следующих водохозяйственных бассейнов: Арал-Сырдарьинский, Ертисский (Иртышский), Чу-Таласский. Однако, для Балхаш-Алакольского водохозяйственного бассейна характерно увеличение стока к концу столетия, что можно объяснить возможной более продолжительной деградацией ледников. Все равнинные водохозяйственные бассейны, в частности Нура-Сарысуский, Есильский, Жайык-/Урало-Каспийский, и Тобол-Тургайский имеют тенденцию сокращения стока воды к концу столетия, что связано с увеличением температуры воздуха, высокой испаряемостью и незначительным повышением количества осадков (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022; Shahgedanova et al., 2020). Согласно оценкам Болатовой и соавторов (Bolatova et al., 2023) для двух притоков реки Ертис (бывший Иртыш) на Казахстанском Алтае, среднегодовой сток реки Оба по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 увеличится на 5,7–8,1 % по сравнению с базисным периодом 1981–2010 гг. Для бассейна реки Ульба прогнозы показывают небольшое увеличение стока к середине столетия по обоим сценариям и в отдалённом будущем по сценарию RCP4.5 (2–4 %), и небольшое снижение на 1 % в отдалённом будущем по сценарию RCP8.5 — всё по сравнению с базисным периодом.

Заключение

Последствия изменения климата уже ощущаются в Казахстане и в будущем будут усиливаться при всех климатических сценариях. Изменяется не только средний уровень температуры воздуха и количества осадков, меняются также другие характеристики, в том числе частота и интенсивность погодных и климатических экстремумов. Последствия изменений климата в будущем могут иметь как негативные, так и позитивные последствия. С учётом того, что существующая инфраструктура создана в целом под климатические условия прошлых десятилетий, изменения климата в основном приводят к отрицательным последствиям, особенно в засушливых регионах, и часто очень значительным. Прежде

всего, это связано с ростом вероятности и интенсивности волн жары и с изменениями гидрологического цикла (8-е национальное сообщение Республики Казахстан по РКИК ООН, 2022; Salnikov et al., 2023).

Изменение климата влияет на условия формирования речного стока в аридных и горных районах Казахстана. Сток в основном определяется долей (степенью) оледенения и влиянием температуры воздуха на все компоненты горной криосферы: снега, ледники и многолетнюю мерзлоту. Разрежённость сети станций гидрометеорологического мониторинга, особенно в предгорных и горных районах, и сети наблюдений за компонентами криосферы в Казахстане создают неопределенность в чёткой оценке изменения климата и его влияния на оледенение и водные ресурсы. Прогнозы на будущее остаются крайне неопределенными.

Совершенствование гидрометеорологического и гляциологического мониторинга, а также механизмов сбора, анализа и обмена данными между соответствующими учреждениями и ведомствами будет способствовать лучшему пониманию происходящих изменений и повышению точности климатических прогнозов и, как следствие, улучшению систем раннего предупреждения на случай чрезвычайных ситуаций и разработке адаптационных мер и решений в области управления водными ресурсами и адаптации к изменению климата.

3.3. Изменение климата в Кыргызстане

Эрлан Азисов^a, Томас Сакс^b, Серикжан Атанов^b, Мартина Барандун^b

^a Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызстан

^b Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

Введение

Территория Кыргызстана, расположенная в Центральной Азии по соседству с пустынями, а также на значительном удалении от океанов и морей, характеризуется континентальным и засушливым климатом. Всё разнообразие природно-климатических условий страны можно объединить в четыре природно-климатических пояса: 1) долинно-предгорный, 2) среднегорный, 3) высокогорный, 4) нивальный. На территории Кыргызской Республики обычно выделяют четыре климатических региона: Северный и Северо-Западный, Юго-Западный, Иссык-Кульская котловина и Внутренний Тянь-Шань⁵ (Подрезов, 2014). В целом климатические условия определяются взаимодействием юго-западной ветви сибирской антициклонической циркуляции и циклонической активности с запада (Aizen et al., 1995).

Сведения об изменении климата в прошлом

Большинство исследований, посвященных Центральной Азии, сходятся во мнении, что тенденция к потеплению среднегодовых температур менее выражена на больших высотах, чем на равнинах и в защищенных межгорных долинах (Unger-Shayesteh et al., 2013). В зимние месяцы более сильный тренд потепления можно выявить на больших высотах Тянь-Шаня (Kriegel et al., 2013; Mannig et al., 2013; Zhang et al., 2009).

На всей территории Кыргызстана среднегодовая температура в XX веке увеличилась на 1,6 °C за 100-летний период. Наибольшее изменение наблюдалось зимой (2,6 °C), а наименьшее — летом (1,2 °C). Кроме того, в бассейне реки Нарын потепление в январе достигло 5,2 °C. Для отдельных климатических регионов увеличение среднегодовой температуры воздуха было различным. Количество атмосферных осадков в целом по Кыргызстану не имело существенной тенденции изменения, однако несколько

⁵ Третье национальное сообщение Кыргызской Республики по РКИК ООН, 2016:
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NC3_Kyrgyzstan_Russian_24Jan2017.pdf

увеличилось (примерно на 23 мм) во Внутреннем Тянь-Шане. Кроме того, в некоторых субрегионах зафиксировано как уменьшение, так и увеличение среднегодового количества осадков (Абдырасуова и соавт., 2011). Изменения количества осадков в стране, по-видимому, не указывают на какую-либо значительную тенденцию.

Ожидаемые изменения климата в будущем

Прогнозируется, что потепление на территории Центральной Азии будет несколько больше, чем в среднем по миру. Среднемодельное бореальное летнее потепление в 2071–2099 гг. по прогнозам составит около 2,5 °C и 6,5 °C выше уровня 1951–1980 гг. при 2 °C и 4 °C в мире (Reyer et al., 2015). Изменения климата в будущем в Кыргызстане оцениваются по различным климатическим сценариям и моделям в Первом, Втором и Третьем национальных сообщениях. В среднем по Кыргызстану в 2100 году ожидается повышение температуры на 6,1 °C по среднему сценарию и на 4,7 °C по мягкому сценарию. При пессимистичном сценарии 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 мульти модельном прогоне гораздо более выражены зимой (декабрь — февраль), чем летом (июнь — август) (Reyer et al., 2015). Помимо изменений в количестве осадков, Кыргызстан, вероятно, будет испытывать повышенную засушливость в более низких районах из-за увеличения испарения в результате повышения температуры.

Влияние изменения климата на обеспеченность водой

Грядущие изменения климата приведут к изменениям в сезонности стока, в том числе к уменьшению соотношения между объёмами стока тёплого и холодного сезонов и смещению пика стока тёплого сезона в сторону бореальной весны. Ожидается, что время наступления пика стока из-за аблации ледников будет напрямую связано с масштабом потепления и темпами его наступления (Rounce et al., 2023). В некоторых высокогорных водосборных бассейнах наблюдается увеличение зимнего стока (Saks et al., 2022). Также был обнаружен сдвиг в сторону более раннего появления снежного покрова и более раннего его таяния (Dietz et al., 2014). Уже сейчас в Центральной Азии наблюдается переход от снежных к дождовым осадкам, что влияет на сток рек (Li et al., 2020).

Скорость сокращения площади ледников составляет 0,2–1 % в год, а их таяние не только становится всё более интенсивным, но и увеличивается продолжительность периода аблации с ранней весны до поздней осени (Barandun et al., 2020). Более длительный период таяния и более интенсивное таяние первоначально приведут к увеличению стока до достижения пика водности. Ожидается, что после пика водности вклад в сток талой воды из ледников будет уменьшаться (Kaser et al., 2010; Huss & Hock, 2018; Barandun et al., 2020).

Деградация ледников негативно скажется на сельском хозяйстве, поскольку в долгосрочной перспективе, по мере уменьшения количества, площади и объёма ледников, дефицит пресной воды будет особенно ощутим в вегетационный период. В настоящее время только около 7 % земель в Кыргызстане пригодны для орошаемого земледелия, и изменение структуры сезонного стока и общего объёма стока при текущем изменении климата может существенно повлиять на этот показатель. Отступающие ледники часто оставляют после себя запруженные ледниковой мореной озёра, что потенциально может привести к катастрофическим наводнениям. Например, большинство ледниковых озёр на севере Тянь-Шаня, нанесённых на карту в 2000-х годах, образовались в основном после 1980-х годов (Narama et al.,

2009). Недавнее исследование (Dayrov et al., 2022) показывает, что произошли значительные изменения в динамике 242 ледниковых озёр на Киргизском и Терской хребтах, что составляет 30 % от общего числа ледниковых озёр в обоих районах. В период с 2017 по 2019 год появилось 46 новых ледниковых озёр, а 18 ледниковых озёр исчезли.

Заключение

Изменение климата в Кыргызстане влияет на криосферу, вызывая значительные изменения температуры воздуха и режима осадков. На протяжении XX века средняя температура на территории страны повысилась на 1,6 °C, причём зимой потепление было более значительным — на 2,6 °C. Эти наблюдаемые изменения в сочетании с неопределенностью тенденций выпадения осадков подчёркивают уязвимость криосферы Кыргызстана к воздействию меняющегося климата (Абдырасуова и соавт., 2011).

Изменение климата существенно влияет на формирование речного стока в Кыргызстане, где гидрологическая система тесно связана с оледенением. Ледниковые талые воды вносят значительный вклад в речной сток, а изменения в сроках и интенсивности абляции ледников напрямую влияют на сезонность стока. Прогнозы на будущее предполагают изменение объёмов стока, сроков пиковых расходов и повышение риска наводнений, связанных с прорывом ледниковых озёр.

Существуют определённые проблемы и неопределенности в оценке влияния изменения климата на оледенение и, как следствие, на водные ресурсы Кыргызстана. Исторические данные показывают различия в тенденциях выпадения осадков, что препятствует всестороннему пониманию гидрологической динамики. Ограниченностю данных и результатов мониторинга подчёркивает потребность в более совершенных методах измерения сокращения площади ледников, динамики ледниковых озёр и изменения стока. Эти ограничения угрожают точности оценок воздействия и эффективности планирования с учётом сценариев будущего изменения климата (Абдырасуова и соавт., 2011; Dayrov et al., 2022).

Улучшение мониторинга состояния атмосферы, криосферы и гидросферы Кыргызстана имеет важное значение в условиях изменения климата. Получение точных данных о температуре, осадках и динамике ледников зависит от надёжных и систематических процессов мониторинга. Расширение сети мониторинга атмосферы, криосферы и гидросферы, наряду с внедрением передовых технологий мониторинга и координацией усилий национальных и международных агентств по созданию стандартизованных методик мониторинга, позволит понять как прямые последствия изменения климата, так и заложить основу для принятия научно обоснованных решений и устойчивого управления водными ресурсами.

3.4. Изменение климата в Таджикистане

Хофиз Наврузшоев^a, Серикжан Атанов^b, Абдулхамид Каюмов^a, Мартина Барандун^b

^a Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана», Душанбе, Таджикистан

^b Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

Введение

Таджикистан известен как страна Центральной Азии с преимущественно горным ландшафтом. Горы занимают почти 93 % территории Таджикистана (Xenarios et al., 2019; Gulahmadov et al., 2021). Влияние изменения климата в Таджикистане прослеживается во многих сферах жизни. В период с 1992 по 2016 год от стихийных бедствий пострадало более 80 % населения Таджикистана, что привело

к экономическим потерям в размере 1,8 млрд долларов США. Последствия изменения климата особенно тяжело отражаются на сельском хозяйстве, а экстремальные погодные явления усугубляют проблемы сельских жителей (Library of Congress, 2007). Изменения температуры воздуха и количества осадков в результате изменения климата могут серьёзно повлиять на гидрологический режим, водные ресурсы и речные бассейны Таджикистана (Kure et al., 2013; Pohl et al., 2015).

Таджикистан расположен в субтропической зоне и имеет преимущественно континентальный климат; вместе с тем в стране наблюдаются резкие различия в климатических условиях в зависимости от высоты над уровнем моря (Kobuliev et al., 2021). Согласно популярной классификации климата Кёппена-Гейгера, два наиболее распространённые виды климата в Таджикистане — это холодный полузасушливый климат и средиземноморский климат с жарким летом. Переход между четырьмя основными сезонами относительно резок. В субтропических низменностях на юго-западе страны, где наблюдаются самые высокие температуры, климат особенно сухой. Диапазон летних температур в этих районах обычно составляет от 27 °C до 30 °C, в то время как экстремальные показатели достигают 50 °C. Диапазон температур в зимнее время — от -1 °C до 3 °C. На восточном Памире летние показатели температуры колеблются от 5 °C до 20 °C, а зимние — от -15 °C до -20 °C. В некоторых регионах (например, в Мургабском районе, граничащем с Китаем) температура зимой может опускаться до -45 °C; более того, в самых высоких точках температура может достигать экстремального значения -60 °C (Library of Congress, 2007; Профиль изменения климата: Таджикистан, 2020).

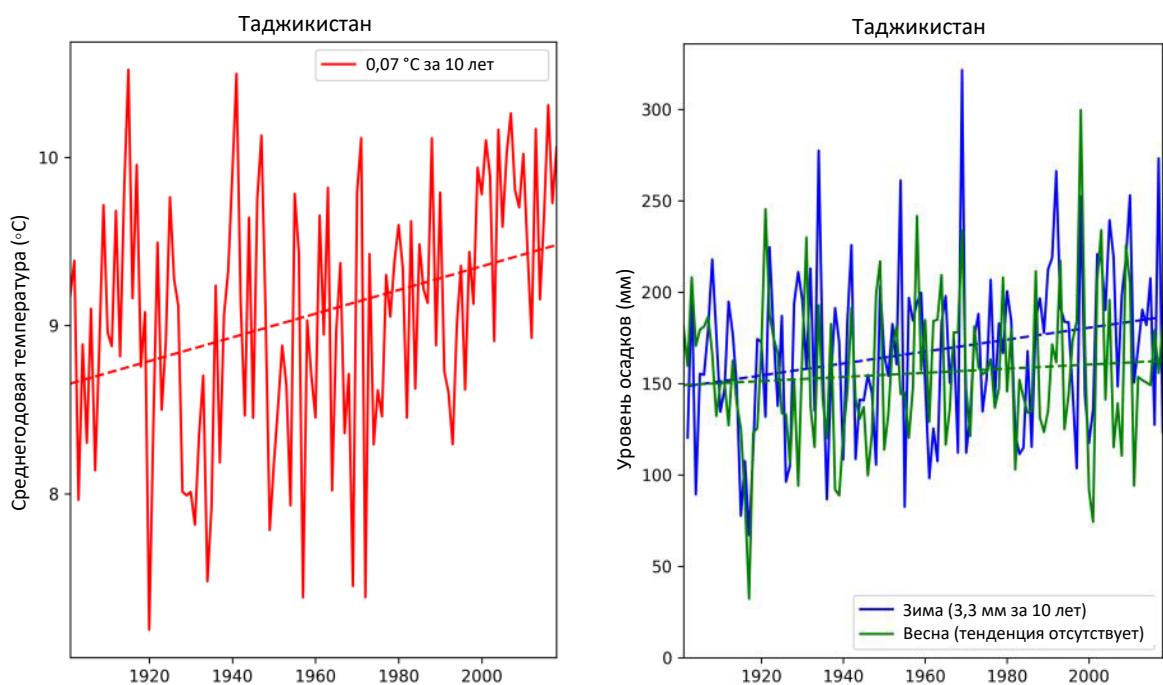


Рисунок 3.4.1. Прошлые климатические тенденции среднегодовой температуры с 1900 по 2016 год. Пунктирные линии представляют линейную тенденцию во времени. Существенное изменение за 10 лет наблюдается в правом верхнем углу. (Источник: Профиль изменения климата: Таджикистан.)

Рисунок 3.4.2. Прошлые климатические тенденции зимних и весенних осадков с 1900 по 2016 год. Пунктирные линии представляют линейную тенденцию во времени. Существенное изменение за 10 лет наблюдается в правом нижнем углу. (Источник: Профиль изменения климата: Таджикистан.)

Сведения об изменении климата в прошлом

Климат Таджикистана резко континентальный, что приводит к большим сезонным колебаниям температур. Температуры в Таджикистане строго контролируются высотами; чем выше расположение, тем обычно ниже температура. Таким образом, учёт высоты считался важным для объяснения пространственных колебаний температуры в Таджикистане, для которого характерны высокие температуры в течение 5 месяцев со среднегодовым изменением от 12,9 °C на станции Мургаб (на востоке) до 29,26 °C на станции Нижний Пяндж (на юге) в течение всего года (рис. 3.4.3, Гулахмадов, 2022). В зависимости от высоты над уровнем моря площадь и характер распределения ледников также меняются: таяние ледников значительно больше на западе и уменьшается в центральной и восточной частях страны (Hoelzle et all., 2019; Barandun et al., 2020; Barandun & Pohl, 2023).

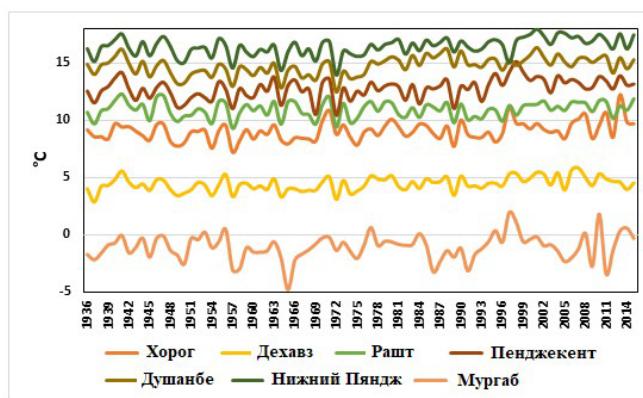


Рисунок 3.4.3. Среднегодовая температура на исследованных станциях (°C) в период 1936–2015 гг.

(Источник: Гулахмадов, 2022)

В период с 1940 по 2017 гг. Таджикистан испытал рост температуры на 0,1–0,2 °C за каждое десятилетие этого периода. Растёт количество дней с температурой 40 °C и выше (рис. 3.4.4). Наибольший рост температуры наблюдался в Дангаре (1,2 °C) и в Душанбе (1,0 °C). Горные районы испытали увеличение на 0,3–0,5 °C, в то время как в альпийских зонах увеличение составило 0,2–0,4 °C. Последние тенденции потепления, зафиксированные в период 2001–2010 гг., показывают, что средняя температура за каждое десятилетие была на 0,8 °C выше, чем в среднем для районов, находящихся на 1000–2500 м над уровнем моря. В альпийской зоне наблюдаемый рост составил на 0,2 °C выше нормы. Температуры были выше в среднем на 0,1–1,1 °C зимой и на 0,1–1,3 °C весной. Осенняя температура во всех горных районах превысила средний показатель на 0,6–1,1 °C^{6,7} (Мирзохонова, 2022).

⁶ Национальная стратегия адаптации к изменению климата Республики Таджикистан на период до 2030 года, 2019: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/taj190980.pdf>

⁷ Четвёртое национальное сообщение Республики Таджикистан по РКИК ООН, 2022: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/4NC_TJK_ru_0.pdf

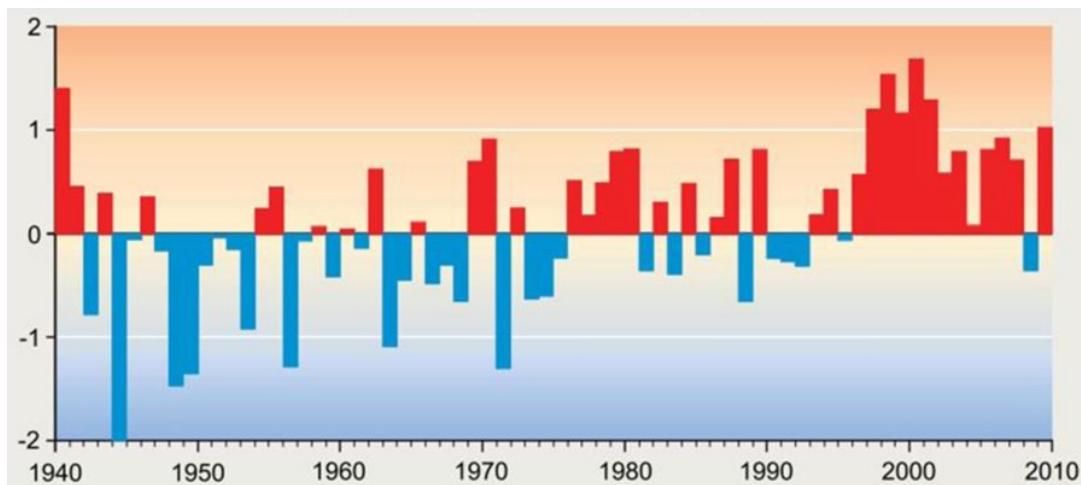


Рисунок 3.4.4. Ежегодное отклонение температуры воздуха от средней многолетней нормы в период с 1961 по 1990 год, в °С (Источник: Национальная стратегия адаптации к изменению климата Республики Таджикистан, 2019)

В работе Финаева и соавторов (Finaev et al., 2016) проанализированы данные высокогорных метеорологических станций Таджикистана. Результаты показали, что средняя температура воздуха на многих станциях повысилась, а на некоторых — понизилась. Что касается осадков, то на большинстве станций их количество увеличилось.

Ожидаемые изменения климата в будущем

По прогнозам, к 2050 году среднегодовая температура увеличится на 2 °C, особенно в период с декабря по август (Всемирный банк, Портал знаний об изменении климата). Анализ временных рядов за последние 59 лет показывает, что температура воздуха постоянно повышается со средней скоростью 0,2–0,25 °C в декаду в западной части Таджикистана (Brhane et al., 2023). Средняя температура воздуха в Таджикистане повышается равномерно в большинстве районов, с небольшим превышением в восточной части страны. 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 (диапазон межмодельного разброса +1,1...+2,8 °C по сценарию RCP8.5), а в отдалённом будущем (2071–2099 гг.) температура значительно повысится (диапазон межмодельного разброса +4,8...+6,6 °C по сценарию RCP8.5) в широком диапазоне между +2,8 и +6,6 °C по сценарию RCP8.5. Эти изменения температуры будут зависеть от уровня выбросов (Aalto et al., 2017).

Прогнозируемый сигнал изменения климата применительно к осадкам слабый, и модели дают противоречивые прогнозы относительно направления изменений. В среднем ожидается уменьшение количества осадков в западной части страны, а в горной восточной части — их увеличение. Однако, поскольку в восточной части страны выпадает очень мало осадков (обычно менее 100 мм в год), прогнозируемые изменения также невелики. Например, изменение на +10 % приведёт к увеличению лишь на +5 мм или +10 мм в год, что не является значительным (Aalto et al., 2017).

Будущее потепление климата повлечёт за собой раннее таяние снега в весенние месяцы, что приведёт к частым наводнениям (Xenarios et al., 2019). Ожидается, что в районах с преобладанием снежного покрова и ледников, среднегодовой речной сток будет расти из-за повышения температуры воздуха и последующего увеличения скорости таяния снега и льда примерно до 2060 года. Однако примерно с 2080 года прогнозируется снижение среднегодового стока в связи с исчезновением небольших ледников в районах с преобладанием ледников (Kure et al., 2013).

Влияние изменения климата на обеспеченность водой

Засуха или нехватка воды могут повлиять на качество воды, так как уменьшение речных стоков при засухе приводит к нехватке для удаления нечистот и нагрузок сточных вод. В результате увеличивается концентрация патогенных микроорганизмов, что может вызвать более активное распространение инфекций. Повышение летних температур приводит к росту спроса на питьевую воду, усилиению давления на подземные воды, уменьшению пополнения запасов подземных вод⁸.

Основными видами стихийных бедствий являются оползни, засухи, землетрясения, наводнения и эпидемии. В условиях продолжающегося изменения климата в будущем эти явления будут усиливаться. Самая сильная засуха в стране была в 2000 году, которая затронула около 3 млн человек. Около 36 % населения Таджикистана подвержено риску оползней и селей. В 2006 году около 13 тыс. человек пострадали от наводнений и оползней⁹. В 2017 году 157 домов, 604,4 га посевых площадей, 16 мостов и около 1200 км дорог пострадали из-за 720 снежных лавин, 41 селевого потока, 32 чрезвычайных ситуаций, связанных с повышением уровня воды в реках, 23 оползней, 33 землетрясений, 21 камнепада и 13 сильных ветров. Общие потери оцениваются в 400–500 млн долларов США (Хакимов, 2019, Khakimov et al., 2020). По данным Управления ООН по координации гуманитарных вопросов, 85 % территории Таджикистана находится под угрозой возникновения селей; за 1990-е годы Главгеология Таджикистана зарегистрировала около 50 тыс. оползней (Barbone et al., 2010). В середине XX века около 6 % площади Таджикистана было покрыто ледниками. К началу XXI века это значение, предположительно, сократилось до 5 %. Одновременно с этим объём ледяной массы, находящейся в ледниках Таджикистана, по данным Третьего национального сообщения по РКИК ООН, сократился на 30 % за тот же период. По прогнозам, к концу века ледники Центральной Азии потеряют до 50 % своей массы в зависимости от сценария выбросов. Отступление ледников окажет очень значительное влияние на речной сток. Считается, что около 50 % стока Амударьи формируется за счёт таяния ледников, такая же зависимость наблюдается и для большинства других рек Таджикистана¹⁰.

Заключение

Последствия изменения климата в Таджикистане очевидны, особенно в криосфере страны. За последние десятилетия в Таджикистане произошло значительное повышение температуры, причём наблюдаемые тенденции указывают на увеличение температуры на 0,1–0,2 °C за каждое десятилетие в период с 1940 по 2017 год. Потепление более выражено в некоторых районах, таких как Дангаре и Душанбе, где наблюдался рост температуры на 1,2 и 1,0 °C, соответственно (Гулахмадов, 2022). Горные и альпийские районы также сталкиваются с повышением температуры, что угрожает ледникам и процессам снеготаяния. Повышение средних зимних и осенних температур и рост количества дней с температурой выше 40 °C подчёркивают уязвимость криосферы Таджикистана к изменению климата (Мирзохонова, 2022; Национальная стратегия адаптации к изменению климата Республики Таджикистан, 2019).

Изменение климата существенно влияет на факторы, определяющие речной сток Таджикистана, и ледники играют решающую роль в этой гидрологической системе. По данным портала знаний Всемирного банка об изменении климата, около 50 % стока реки Амударьи, являющейся жизненно важным источником воды, формируется в основном за счёт таяния ледников и снега. Ожидаемое увеличение среднегодового стока реки примерно до 2060 года, вызванное повышением температуры

⁸ Четвёртое национальное сообщение Республики Таджикистан по РКИК ООН, 2022: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/4NC_TJK_ru_0.pdf

⁹ Всемирный банк, Портал знаний об изменении климата (Climate change knowledge portal) [только на англ.]: <http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/countryprofile>

¹⁰ Всемирный банк, Портал знаний об изменении климата (Climate change knowledge portal) [только на англ.]: <http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/countryprofile>

воздуха и усиленным таянием снега и льда, иллюстрирует сложную взаимосвязь между изменением климата и гидрологическим циклом. После этого пика стока вклад талых вод ледников будет уменьшаться, и возникнут проблемы, связанные с прогнозируемым снижением стока в регионах с преобладанием ледникового питания рек после 2080 года (Kure et al., 2013; Xenarios et al., 2019).

Оценка воздействия изменения климата на оледенение и водные ресурсы в Таджикистане сопряжена со многими трудностями и неопределенностями. Исторические данные, представленные в Профиле изменения климата и Национальной стратегии адаптации к изменению климата, отражают ограниченность имеющейся информации и препятствуют проведению всесторонних оценок. Такие пробелы в данных затрудняют точное прогнозирование будущей траектории динамики ледников и водных ресурсов. Кроме того, широкий спектр возможных опасных природных явлений, включая оползни, засухи и наводнения, усложняет оценку и подчеркивает необходимость совершенствования систем мониторинга, методов сбора данных и потенциала для углубления понимания этих динамичных систем (Хакимов, 2019, Khakimov et al., 2020; Barbone et al., 2010).

Решение проблем, связанных с изменением климата в Таджикистане, требует срочного внимания к совершенствованию систем мониторинга и механизмов обмена данными. Улучшение атмосферного, криосферного и гидрологического мониторинга, с особым акцентом на пространственно-временные изменения температуры, осадков и динамики ледников, необходимо для проведения точных оценок и принятия обоснованных решений. Сотрудничество между национальными и международными учреждениями, а также интеграция передовых технологий могут способствовать созданию эффективной системы мониторинга. Такое совершенствование не только необходимо для достижения понимания непосредственных последствий изменения климата, но и имеет решающее значение для прогнозирования будущих изменений в криосфере и адаптации к ним, а также для обеспечения устойчивого управления водными ресурсами в Таджикистане (Aalto et al., 2017; Всемирный банк, Портал знаний об изменении климата).

3.5. Изменение климата в Туркменистане

Серикжан Атанов^a, Мартина Барандун^a

^a Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

Введение

Для Туркменистана характерен крайне континентальный и сухой климат, на который оказывают влияние различные факторы. Такие климатические условия обусловлены низкоширотным положением, значительной удалённостью от океанов, особенностями атмосферной циркуляции, характеристиками подстилающей поверхности, наличием горных хребтов на юго-западе, юге и юго-востоке (Orlovsky, 1994).

Аридный климат характеризуется минимальным количеством осадков, низкой влажностью воздуха, редкой облачностью, повышенной испаряемостью, частыми засухами и сухими ветрами. В Туркменистане экологические условия способствуют расцвету естественной растительности преимущественно в холодное время года, чему способствуют влажные и сырые зимне-весенние периоды, благоприятные для роста эфемеров и эфемероидов. Однако в жаркие и засушливые летние месяцы растительность подвергается иссушению. Выращивание сельскохозяйственных культур в Туркменистане требует искусственного орошения, так как естественных условий для их роста недостаточно (Orlovsky, 1994).

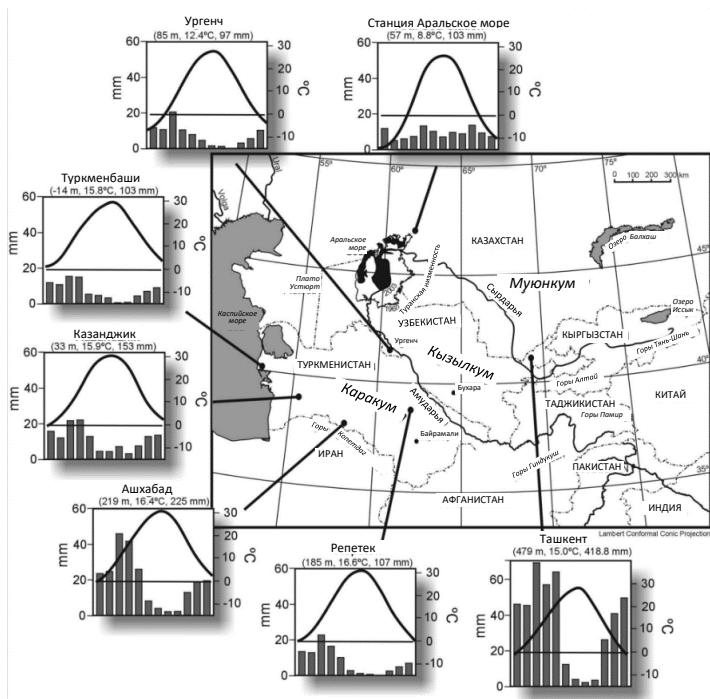


Рисунок 3.5.1. Обзор и сравнение месячного распределения осадков и температуры воздуха, измеренных на различных метеорологических станциях над Туркменистаном и другими частями Центральной Азии (Источник: Lioubimtseva & Cole, 2006)

Пустыни занимают более 95% всей территории Туркменистана и более половины территории Узбекистана и Казахстана (Lioubimtseva & Cole, 2006). Пустыни и полупустыни Центральной Азии имеют типичный континентальный климат, который можно разделить на два субрегиона — северный (в основном Казахстан) и южный, или ирано-туранский (Petrov, 1976; Lioubimtseva, 2002). В южной ирано-туранской части региона зимы характеризуются более мягкими условиями, средняя температура января колеблется между -10°C и 0°C , а средняя температура июля держится около 32°C , достигая максимума 52°C в восточных Кара-Кумах (Lioubimtseva & Cole, 2006). Пик осадков в этом субрегионе приходится на весну, совпадающую с северной миграцией иранской ветви полярного фронта (Lioubimtseva & Cole, 2006).

Сведения об изменении климата в прошлом

Исторические изменения климата на территории нынешнего Туркменистана задокументированы посредством различных косвенных признаков, включая биостратиграфические, геоморфологические и археологические данные. По данным Любимцевой и Коула (Lioubimtseva & Cole, 2006) с течением времени в регионе происходили колебания, сопровождающиеся переходом от гиперзасушливых пустынь к субгумидным кустарниковым землям в позднем плейстоцене (Kes et al., 1993; Варущенко и соавт., 1987; Величко и соавт., 1987; Тарасов, 1992; Тарасов и соавт., 1998). Примечательно, что эти экологические сдвиги, в отличие от образования тропических пустынь, имели относительно небольшие амплитуды в позднем плейстоцене и голоцене, характеризуясь продолжительными засушливыми периодами, перемежающимися кратковременными влажными интервалами (Lioubimtseva & Cole, 2006). По имеющимся данным, колебания количества осадков в эти периоды не превышали 150–200 мм в год (Lioubimtseva & Cole, 2006).

Документально зафиксированные переходы от гиперзасушливых пустынь к субгумидным кустарниковым землям, суровая засушливая фаза последнего ледникового максимума (около 21 тыс. лет до настоящего времени; Аубекеров и соавт., 1989; Тарасов, 1992) и последующий климатический оптимум голоцена, известный как Лавляканская влажная фаза, повлияли на развитие субгумидных

степей на плато Устюрт (Долуханов, 1985; Kes et al., 1993). Многочисленные меньшие колебания засушливости происходили в более мелких временных масштабах: исторические документы указывают на незначительное увеличение количества осадков на территории между Каспийским и Аральским морями с IX по XIV век нашей эры (Варущенко и соавт., 1987; Долуханов, 1985). Смещение западной циклонической циркуляции, положение Сибирского максимума и влияние Каспийского и Аральского морей сыграли ключевую роль в регулировании количества осадков (Lioubimtseva & Cole, 2006). Воздействие этих климатических изменений очевидно в климате Туркменистана с течением времени через изменчивость и влияние различных факторов на характер осадков (Аубекеров и соавт., 1989; Тарасов, 1992; Долуханов, 1985; Kes et al., 1993; Micklin, 1988; Варущенко и соавт., 1987). Хотя палеоданные дают представление о геоморфологических и биологических реакциях на изменение климата, прогнозировать будущие тенденции на основе палеоаналогов следует с осторожностью (Lioubimtseva & Cole, 2006).

Метеорологические данные свидетельствуют об устойчивом росте годовых и зимних температур с прошлого века, однако отсутствие долгосрочных наблюдений и сокращение функциональности станций после распада СССР увеличивает неопределенность (Lioubimtseva & Cole, 2006). В докладе МГЭИК 2001 года о засушливости в Центральной Азии отмечается отсутствие заметных тенденций в годовом количестве осадков в регионе в 1900–1995 годах. Несмотря на отсутствие региональных изменений количества осадков, пространственная изменчивость наблюдается в масштабах ландшафта, примером чего являются значительные различия между тенденциями в песчаных пустынях и соседних орошаемых землях в восточном Туркменистане (Неронов, 1997).

Ожидаемые изменения климата в будущем

Анализ тенденций изменения климата в Туркменистане, основанный на данных Любимцевой и Коула (Lioubimtseva & Cole, 2006) и других исследователей, раскрывает нюансы, характеризующиеся пространственной изменчивостью и сложностями в интерпретации данных. На основе палеоаналогичных сценариев прогнозируется, что пустыни Центральной Азии станут более влажными в результате глобального потепления, что приведёт к смещению на юг и вероятной интенсификации западных циклонов, подобно условиям раннего голоцен; однако палеоданные, несмотря на их потенциал в улучшении понимания механизмов изменения климата в течение длительных периодов, в целом не способны отразить более тонкие колебания температуры и осадков (Lioubimtseva & Cole, 2006). Климатические модели предсказывают повышение температуры на 1–2 °C к 2030–2050 годам, при этом прогнозные уровни осадков варьируются, что подчёркивает крайнюю неопределенность моделирования засушливых зон (Lioubimtseva & Cole, 2006). Моделирование сценария REMO-0406, проведённое Дуаном и соавторами (Дуан и соавт., 2019), показывает аналогичную тенденцию значительного повышения температуры с 2016 по 2055 год на 0,51 °C в декаду, что приводит к сокращению снежного покрова. В рамках того же моделирования ожидается увеличение испарения вдоль Каракумского канала и других объектов водной инфраструктуры, что приведёт к значительному сокращению доступных водных ресурсов в Туркменистане (Дуан и соавт., 2019). Национальная стратегия Туркменистана по изменению климата прогнозирует незначительное увеличение количества осадков до 2020 года, а затем их резкое сокращение. Темпы сокращения количества осадков станут более заметными после 2040 года и снизятся на 8–17 % к 2100 году.

Климатические данные, полученные в окрестностях Аральского моря с 1960-х годов, свидетельствуют о сдвиге в сторону более континентального климата с повышением летних температур, понижением зимних температур, уменьшением влажности и изменением сезонности 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, в т. ч. многолетних временных рядов радиометра AVHRR Национального управления океанических и атмосферных исследований США, свидетельствуют об уменьшении засушливости в северной части региона и смещении зоны пустынь на юг (Золотокрылин, 2003). Харин и соавторы (Харин и соавт., 1998), используя анализ многолетних рядов AVHRR, также указывают на возможное уменьшение засушливости в этом регионе в течение последних десятилетий.

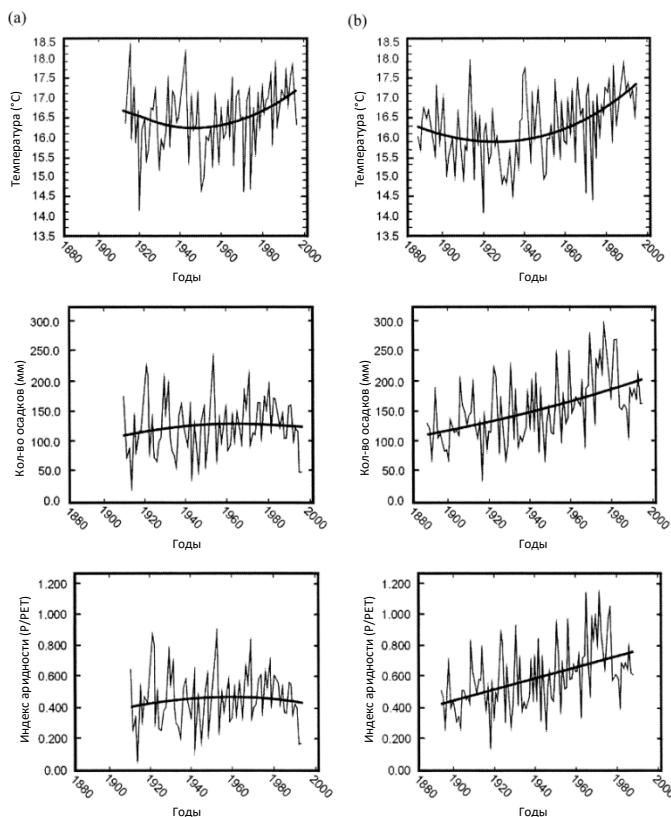


Рисунок 3.5.2. Количество осадков, температура и индекс аридности (P/PET): (а) станция Репетек, Туркменистан, 1910–1995 гг.; (б) станция Байрамалы, Туркменистан, 1910–1995 гг. (Источник: Lioubimtseva & Cole, 2006)

Прогнозы изменения климата в Туркменистане, основанные на всестороннем анализе исторических данных и научных оценок, рисуют сложную картину меняющихся экологических условий. Взаимодействие между глобальным изменением климата и местными антропогенными процессами, такими как экстенсивное перенаправление водных ресурсов и деградация Аральского моря, остаётся неучтённым в современных климатических моделях, но может оказывать существенное влияние на изменение климата региона. В связи с ожидаемым повышением температуры на 1–2 °С к 2030–2050 гг. и изменчивыми прогнозами осадков, регион сталкивается с серьёзными проблемами, касающимися различных секторов социально-экономического развития страны, включая сферы водного и сельского хозяйства и здравоохранения. Прогнозы предполагают значительное уменьшение количества осадков после 2040 года, что создаёт существенные риски водообеспеченности и потенциально может повлиять на такие сферы, как сельское хозяйство, здравоохранение и общий социально-экономический ландшафт Туркменистана.

Влияние изменения климата на обеспеченность водой

Прогнозы для Туркменистана указывают на ожидаемую траекторию повышения температуры и вероятной засушливости в ближайшие десятилетия, с усилением засушливости особенно в западной

части страны. Ожидается, что повышение температуры будет наиболее выраженным летом и осенью, а зимой оно будет более умеренным. Особенno заметное уменьшение количества осадков прогнозируется в летние и осенние месяцы, в то время как в зимние месяцы может наблюдаться либо незначительное увеличение, либо их количество останется неизменным. Эти сезонные сдвиги могут иметь серьёзные последствия для сельского хозяйства, особенно в западном Туркменистане и Узбекистане, где частые засухи представляют угрозу для таких культур, как хлопок, зерновые и кормовые культуры. Это, в свою очередь, увеличивает и без того значительные потребности в воде для орошения, усугубляя существующий водный кризис и ускоряя антропогенное опустынивание. Продолжающиеся в течение последнего десятилетия сильные засухи в сочетании с непрерывной деградацией Аральского моря и его притоков — Амударья и Сырдарья — стала причиной водных споров и эскалации напряжённости между государствами бассейна Аральского моря. Засушливые низменности обоих речных бассейнов уже испытывают на себе последствия изменения климата в виде увеличения частоты засух и отступления ледников (IPCC, 2007). Продолжающееся таяние ледников и снежных покровов, усиливающееся в результате потепления климата (IPCC, 2007; Аламанов и соавт., 2006; Подрезов и соавт., 2001), предположительно, приведёт к временному увеличению стока воды в ближайшие десятилетия, что может способствовать дальнейшему расширению неустойчивого сельскохозяйственного землепользования. Признавая вероятность усиления аридности и водного стресса, необходимо принять срочные меры, включая новые политические и экономические механизмы, чтобы снять напряжённость в будущем. Адаптационный потенциал западного субрегиона Центральной Азии ограничен существующим водным стрессом, региональной деградацией земель и неэффективными методами ирrigации, унаследованными от советской эпохи, что создаёт значительные проблемы для устойчивого развития в условиях более жаркого и сухого климата (Lioubimtseva et al., 2012).

По мнению Любимцевой и соавторов (Lioubimtseva et al., 2012), обострение проблем, связанных с глобальным изменением климата и угрожающих средствам к существованию человека, повышает восприимчивость к происходящим процессам опустынивания и естественным климатическим колебаниям. В случае с пустынными странами, такими как Туркменистан, ожидаемые последствия изменения климата включают усиление нехватки воды, угрожающей всё большей части населения, потенциальное снижение урожайности, повышенный риск экологических миграций и политических конфликтов — всё это связано с истощением основных ресурсов, жизненно важных для поддержания средств к существованию (Barnet, 2007).

Заключение

Перед Туркменистаном стоит сложная задача, обусловленная континентальным и засушливым климатом в сочетании с историческими изменениями климата и прогнозами на будущее. Сложное взаимодействие географических факторов с преобладанием пустынь, подчёркивает уязвимость Туркменистана и его зависимость от искусственного орошения в сельском хозяйстве. Сведения об изменении климата в прошлом, задокументированные с помощью различных косвенных признаков, свидетельствуют о динамичных экологических переходах в регионе. Однако, учитывая беспрецедентный характер современных антропогенных климатических изменений, следует с осторожностью подходить к прямому применению исторических аналогов для прогнозирования будущих климатических тенденций.

Проекции будущего климата для Туркменистана показывают пространственную изменчивость и неопределённость в моделировании аридных зон, включая повышение температуры воздуха и изменение характера осадков. Влияние изменений климата на обеспеченность водой усугубляется повышением температуры воздуха, сокращением количества осадков и увеличением потребности

в воде для нужд сельского хозяйства. Продолжающаяся деградация Аральского моря и его речных бассейнов усложняет социально-экономический ландшафт, требуя принятия срочных мер и разработки стратегий адаптации.

Для решения этих проблем Туркменистану необходимо принятие целостного подхода, объединяющего исторические знания с современными методами климатологии, что очень важно для разработки эффективных стратегий смягчения последствий. По мере реализации прогнозов будет расти важность принятия стратегий адаптации и соответствующих политических мер, учитывающих предстоящие риски и способствующих активному повышению устойчивости страны к изменению климата.

3.6. Изменение климата в Узбекистане

Гавхар Мамаджанова^{a,b}, Зульфия Куранбаева^b, Зохид Усаров^b

^a Редингский университет, Рединг, RG6 6АН, Великобритания

^b Научно-исследовательский гидрометеорологический институт центра гидрометеорологической службы Республики Узбекистан (Узгидромет), Ташкент, 100052, Узбекистан

Введение

Опустошительные волны жары, засухи и наводнения свидетельствуют о том, что изменение климата и его воздействие на планету¹¹ представляют значительную опасность для Центральной Азии, включая Узбекистан, в течение последних нескольких лет. По данным Всемирной метеорологической организации, в 2023 году вероятность наступления события Эль-Ниньо (крупномасштабная атмосферная циркуляция) и потепления выше, чем в последние годы, что говорит о возможном увеличении рисков изменения климата в сочетании с экстремальными погодными явлениями¹². По предварительным оценкам, неблагоприятные последствия представляют угрозу для экономики страны¹³, при этом риски становятся всё более сложными, а управление водным стрессом в регионе затруднено (Unger-Shayesteh et al., 2013; Shahgedanova et al., 2020).

Жители развивающихся стран и стран с низким уровнем дохода, таких как Узбекистан, очень уязвимы к стихийным бедствиям из-за социально-экономического давления, обусловленного географическим положением и ограниченной системой социального обеспечения, которое ещё больше усугубится в результате глобального потепления (Xenarios et al., 2019). По данным Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН)¹⁴ Узбекистан не в полной мере принял цели по борьбе с изменением климата в рамках Целей устойчивого развития (ЦУР) ООН и ещё не разработал свою стратегию по борьбе с изменением климата. Поскольку проблемы изменения климата носят межсекторальный характер, комплексная система исследований риска бедствий позволила бы разработать конкретные планы по обеспечению готовности к опасностям и реагированию на экстремальные погодные явления в стране.

Сведения об изменении климата в прошлом

Узбекистан расположен в центральной части Евразийского континента. Мощные горные хребты на южной и восточной границах территории являются основным препятствием для поступления осадков из близлежащего Индийского океана, что объясняет засушливость и крайнюю континентальность климата

¹¹ Шестой оценочный доклад МГЭИК «Изменение климата в 2022 году: последствия, адаптация и уязвимость» [только на англ.]: https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf

¹² Всемирная метеорологическая организация: «Ожидается, что Эль-Ниньо продлится как минимум до апреля 2024 года» [только на англ.]: <https://wmo.int/news/media-centre/el-nino-expected-last-least-until-april-2024>

¹³ Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по РКИК ООН:

https://unfccc.int/sites/default/files/resource/TNC_Uzbekistan_under_UNFCCC_rus.pdf

¹⁴ Третий Обзор результативности экологической деятельности Узбекистана: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/epr/epr_studies/ECE.CEP.188.Rus.pdf

страны (Schiemann et al., 2009). Крупномасштабные атмосферные циркуляции, такие как Южное колебание Эль-Ниньо, Североатлантическое колебание и Индийский летний муссон, оказывают положительное влияние на сезонные температуры и осадки, что даёт возможность лучше понять изменения климатических характеристик в Узбекистане (Хайдаров и Герлиц, 2019, Schiemann et al., 2007). Естественная изменчивость климатической системы региона, такая как изменения атмосферной циркуляции, может быть полностью или частично причиной экстремальных погодных явлений, наблюдавшихся в Узбекистане (Gerlitz et al., 2018; Мамаджанова и соавт., 2018).

В целом в Узбекистане выделяют три основные климатические зоны: зону пустынь и сухих степей, занимающую около 79 % территории, зону предгорий и горную зону, занимающие оставшиеся 21 % соответственно (Чуб, 2007). Средняя температура воздуха в июле колеблется от 26 °C на большей части низменностей до 30 °C на юге и в пустынных районах, что делает его самым жарким месяцем в году. Максимальные значения температуры воздуха могут достигать 45 °C в южной части страны. Рекордная температура в 50 °C была зафиксирована в Термезе и пустыне Кызылкум. Самый холодный месяц — январь, когда средняя температура воздуха опускается до 0 °C на юге и может опускаться ниже -8 °C на севере страны. В экстремально холодные годы температура воздуха на плато Устюрт может опускаться ниже -40 °C.

В распределении среднего количества осадков в Узбекистане наблюдается резкий контраст между равнинными и горными районами. Среднегодовое количество осадков на большей части равнин или пустынь и сухих степей (плато Устюрт, пустыня Кызылкум, Каршинская, Дальверзинская и Голодная степи) составляет около 80–200 мм. Однако в предгорьях и горах, особенно на северо-востоке и юго-востоке страны, осадков может выпадать значительно больше. Так, в районах с высотой от 600 до 1000 м над уровнем моря или в предгорьях (Тянь-Шанская и Гиссаро-Алайская горные системы) количество осадков может достигать 500 мм, а выше 1000 м над уровнем моря годовые суммы могут превышать 500 мм. На некоторых склонах, особенно на западных склонах Тянь-Шаня, общее количество годовых осадков может превышать 2000 мм (Чуб, 2007).

Средняя температура воздуха и количество осадков в Узбекистане менялись вместе с глобальным потеплением в течение последних десятилетий (Куранбоева и соавт., 2022, 2023). С 1990-х годов наблюдается значительное повышение температуры на всей территории страны, при этом в большинстве районов Узбекистана наблюдаются тенденции к снижению, хотя и незначительные, количества осадков (рис. 3.6.1–3.6.3). Среднегодовая температура была выше в период 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг., при этом самым тёплым годом стал 2016 год (рис. 3.6.1). Потепление в Узбекистане в последнее время происходит с 1980-х годов, что согласуется с увеличением антропогенных выбросов в атмосферу.

Результаты наблюдений на 82 метеорологических станциях показывают, что среднегодовая температура воздуха за период 1991–2020 гг. увеличилась на 0,8 °C по сравнению со средними многолетними значениями метеорологических данных за 1961–1990 гг. почти на всей территории Узбекистана (Куранбоева и соавт., 2022). На станциях, расположенных в центральных и пустынных районах страны, это значение может достигать 1,5 °C. В предгорных и горных районах наблюдалось небольшое увеличение количества осадков на 20–48 мм в год, однако на равнинных территориях Узбекистана отмечалось уменьшение их количества (10–25 мм в год) (Куранбоева и соавт., 2022).

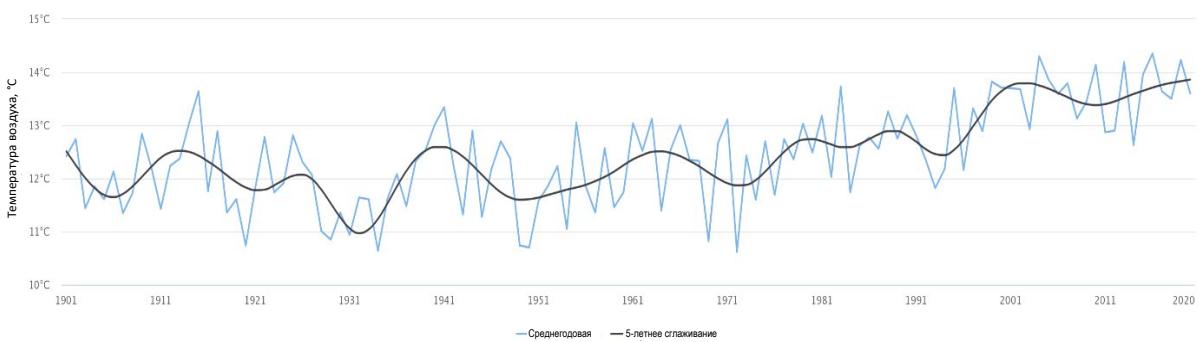


Рисунок 3.6.1. График среднегодовой температуры воздуха (синяя линия) с 1901 по 2020 год с пятилетним сглаживанием (чёрная линия) для Узбекистана. Источник: Отдел климатических исследований Всемирного банка, <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

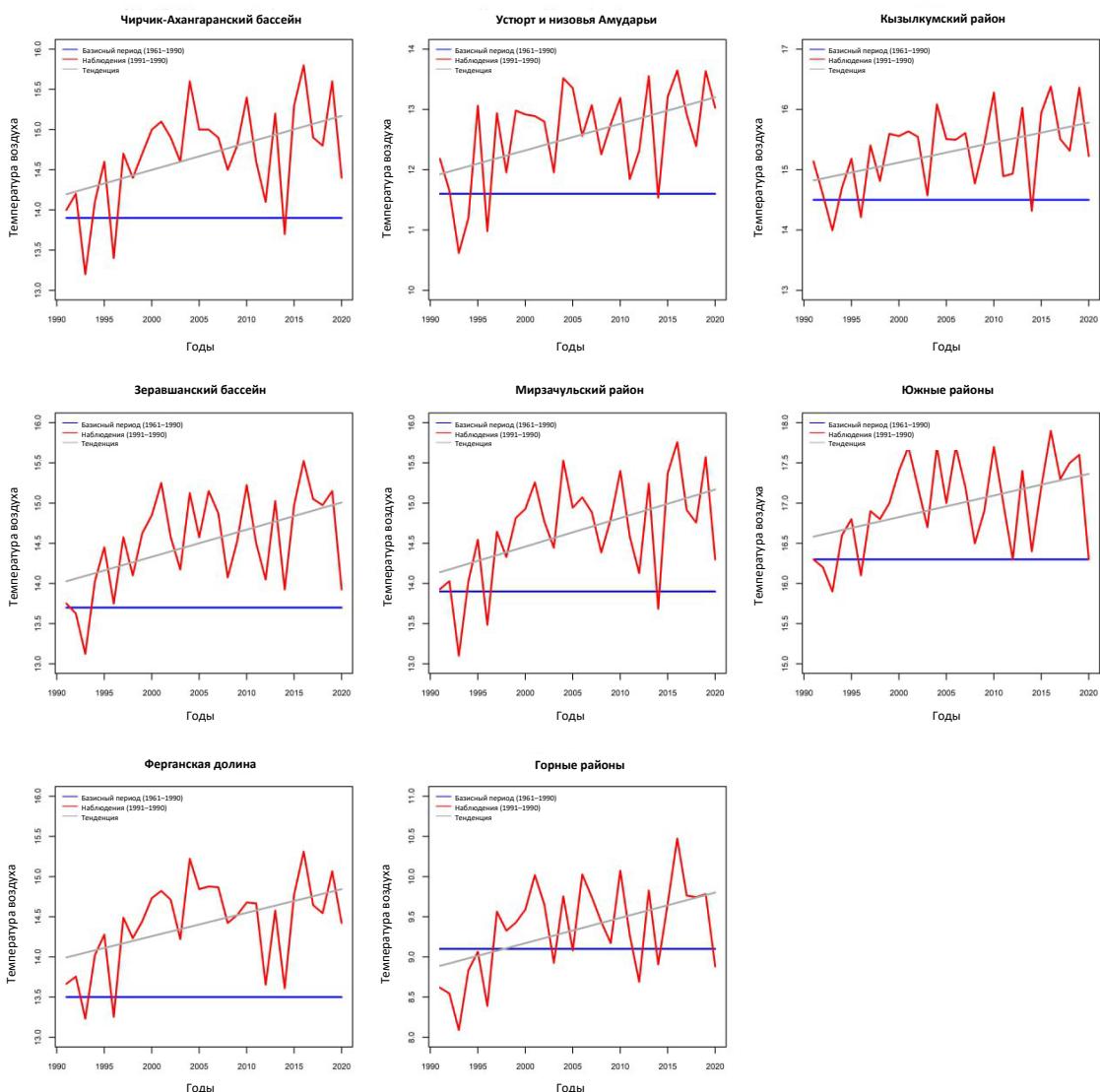


Рисунок 3.6.2. Среднегодовая температура воздуха за 1991–2020 гг. (красные линии) в сравнении со средними многолетними значениями за период 1961–1990 гг. (синие линии) и тенденции изменения температуры (серые линии), наблюдаемые в географических районах Узбекистана. Источник данных: Узгидромет.

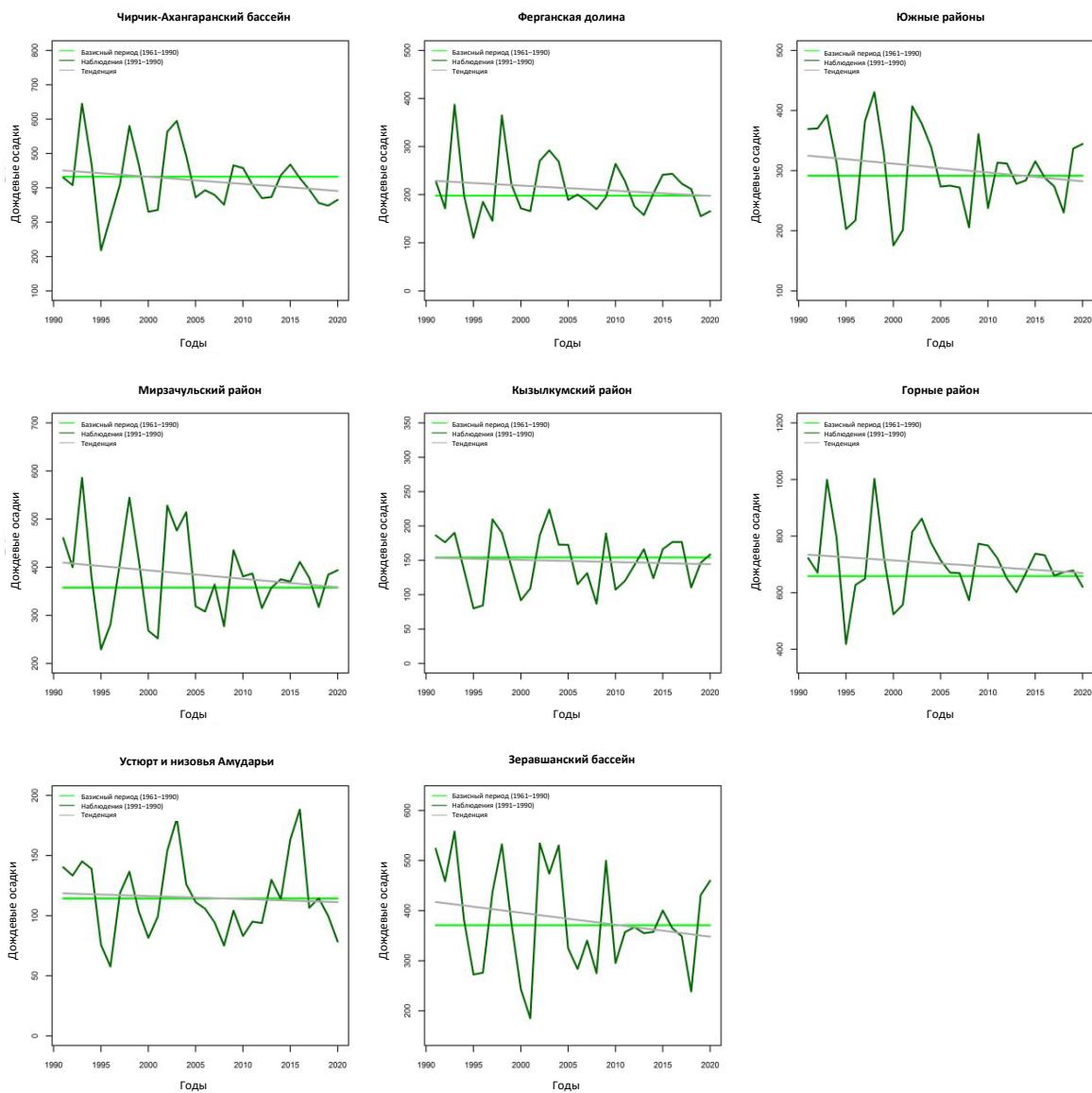


Рисунок 3.6.3. Среднегодовое количество осадков за 1991–2020 гг. (тёмно-зелёные линии) в сравнении со средними многолетними значениями за период 1961–1990 гг. (светло-зелёные линии) и тенденции изменения в количестве осадков (серые линии), наблюдавшиеся в географических районах Узбекистана.

Источник данных: Узгидромет.

Ожидаемые изменения климата в будущем

Прогнозы будущего антропогенного изменения климата Узбекистана в основном сосредоточены на характеристиках температуры приземного воздуха и осадков над регионом, который включает Узбекистан. Например, Озтурк и соавторы (Ozturk et al., 2012, Ozturk et al., 2017) исследовали влияние результатов изменения климата на сезонную изменчивость осадков и температуры над Центральной Азией в рамках Скоординированного эксперимента по даунскейлингу региональных климатических моделей (CORDEX) Регион 8 с использованием моделей RegCM4 и RegCM4.3.5. Результаты, полученные с помощью региональной климатической модели RegCM4 по сценарию ECHAM5-A1B для будущих периодов (2070–2100 гг.) климата Центральной Азии, показывают относительно высокую тенденцию потепления температуры (в среднем от 3 °C до 11,4 °C) и уменьшение количества осадков, особенно в юго-восточной части домена (Ozturk et al., 2012). Результаты сценариев МГЭИК RCP4.5 и RCP8.5 для моделей HadGEM2-ES и MPI-ESM-MR, разукрупнённые с помощью проекции климата по RegCM4.3.5 для ближайшего будущего (2011–2040 гг.), среднего будущего (2041–2070 гг.) и далёкого будущего (2071–

2100 гг.) в работе Озтурка и соавторов (Ozturk et al., 2017), также показывают достаточно хорошее согласие с результатами предыдущего исследования (Ozturk et al., 2012). Региональная климатическая модель высокого разрешения REMO была реализована для Центральной Азии Маннигом и соавторами (Mannig et al. 2013) с целью достижения лучшего понимания сезонной цикличности осадков и температуры при антропогенном изменении климата. Хуанг и соавторы (Huang et al. 2014) спрогнозировали будущее изменение годового количества осадков над Центральной Азией, включая Узбекистан, на период 2011–2100 гг. с помощью МОЦ CMIP5 при различных сценариях выбросов (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5). Авторы обнаружили тенденции к увеличению годового количества осадков (более 3–9 мм за десятилетие) на севере Тянь-Шаньских гор к концу 2100 года по сравнению с предыдущими исследованиями сигналов изменения климата над этим регионом. Авторы предположили, что возможными механизмами увеличения изменений прогнозируемого количества осадков могут быть крупномасштабные потоки водяного пара в атмосфере и поверхностное испарение над исследуемым регионом. Малси и соавторы (Malsy et al. 2012) и Уайт и соавторы (White et al. 2014) исследовали влияние изменения климата на водные ресурсы Центральной Азии, включая Узбекистан. Малси и соавторы (Malsy et al. 2012) обнаружили увеличение среднегодовой водности в большинстве речных бассейнов Центральной Азии с помощью крупномасштабной гидрологической модели WaterGAP3, управляемой тремя МОЦ — ECHAM5, IPSL-CM4 и CNRM-CM3 — при двух сценариях выбросов (SRES-A2 и SRES-B1 МГЭИК) для будущего климата (2071–2100 гг.). Однако в работе Уайта и соавторов (White et al. 2014) прогнозируется снижение расходов воды на 10–20 % в бассейне реки Амударья при использовании модели AMU-WEAP в рамках сценария высоких выбросов (A2) МОЦ CMIP3. Тенденция потепления летних температур на целых 5 °C и сезонные сдвиги в цикле осадков могут привести к увеличению потребности сельского хозяйства в воде с существующих 10,6 % до 16 % стока бассейна Амудары к 2070–2099 гг. (White et al., 2014). Далее Радченко и соавторы (Радченко и соавт., 2017) спрогнозировали потенциальные изменения стока в бассейне реки Сырдарьи в Ферганской долине, используя динамически разукрупнённый сценарий SRES-A1B на период 2071–2100 гг. Было получено увеличение годовой температуры с 3,7 °C до 3,9 °C и увеличение количества осадков с 11 % до 13 % (71–108 мм) для будущего периода 2071–2100 гг. по сравнению с базисным периодом 1971–2000 гг. для 18 исследованных речных водосборов бассейна Сырдарьи. Вероятной причиной этого было названо увеличение эвапотранспирации, вызванное изменением температурного режима в регионе (Радченко и соавт., 2017). Однако авторы исследования сообщили, что годовой сток в Ферганской долине, скорее всего, сократится на 10 %, несмотря на то что для водосборных бассейнов рек, не имеющих оледенения, в будущем ожидается увеличение стока. В то же время прогнозируется сезонное смещение стока на более ранние фазы с увеличением зимне-весеннего стока с 44 % до 107 % и уменьшением (на 12–42 %) летнего стока, когда оросительное водоснабжение имеет первостепенное значение для успешного ведения сельского хозяйства в Ферганской долине. Во многих исследованиях (Sorg et al., 2012a; Sorg et al., 2014; Sorg et al., 2015; Kure et al., 2013; Barandun et al., 2020) были оценены негативные последствия глобального потепления для ледниковых зон Центральной Азии в горных районах, включая Узбекистан. На основе гляциогидрологической модели стока ледников (Glacier Evolution Runoff Model, GERM) и применения разукрупнённых атмосферных данных из проекции CMIP5 (Sorg et al., 2014) спрогнозировано существенное сокращение ледников из-за повышения температуры воздуха над горами Тянь-Шаня, считающимися «водонапорной башней» Центральной Азии (Sorg et al., 2012; Shahgedanova et al., 2020), и его влияние на обеспеченность водой до конца столетия. Более того, увеличение рисков, связанных с изменением климата, и его негативные последствия для сельского хозяйства и производства продовольствия в Центральной Азии при применении сценариев МГЭИК по выбросам парниковых газов SRES-A1B и SRES-A2 были недавно исследованы Зоммером и соавторами (Sommer et al., 2013) и Бободжоновым и Ав-Хасаном (Бободжонов и Ав-Хасан, 2014). В некоторых исследованиях (Xenarios et al., 2019) рассматриваются существующие литературные данные о последствиях

антропогенного изменения климата в регионе и мерах по адаптации с учётом прогнозов изменений в режимах температуры и осадков для региона.

Заключение

Изменения в режимах температуры воздуха и атмосферных осадков, особенно постоянное повышение температуры с 1990-х годов, свидетельствуют о повышенной уязвимости к экстремальным погодным явлениям. Эти изменения, в соответствии с закономерностями глобального потепления, повышают риск тепловых волн и засух на всей территории Узбекистана.

Влияние изменения климата на состояние речного стока в Узбекистане очень велико, поскольку оледенение играет решающую роль в формировании стока. Зависимость от оледенения усложняет динамику водных ресурсов, поскольку прогнозы предсказывают значительное сокращение ледников на Тянь-Шане — важнейшем источнике воды для региона (Sorg et al., 2012; Shahgedanova et al., 2020).

Несмотря на то, что многочисленные климатические модели позволяют получить ценные сведения, оценка влияния изменения климата на криосферу и водные ресурсы остаётся сложной задачей. Ограниченность данных и инфраструктуры мониторинга затрудняют комплексное понимание текущих условий и будущих траекторий. Отсутствие полностью принятого плана действий по борьбе с изменением климата, а также проблемные аспекты водохозяйственной деятельности, усугубляют проблемы, связанные со способностью противостоять бедствиям и обеспечением устойчивого управления водными ресурсами.

Для решения этих проблем необходимо уделить особое внимание совершенствованию комплексного мониторинга климата, криосферы и гидросферы в Узбекистане. Расширение сбора данных с помощью передовых технологий и международного сотрудничества имеет решающее значение для точной оценки и прогнозирования последствий изменения климата.

ГЛАВА 4. ИЗМЕНЕНИЯ В КРИОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

4.1. Изменения в криосфере Казахстана

Игорь Северский^a, Нина Пиманкина^a, Александр Кокарев^a, Василий Капица^a, Замира Усманова^a,

Александр Егоров^a, Мартина Барандун^b

^a Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО,

Алматы, Казахстан

^b Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

Введение

Текущие и прогнозные оценки изменения климата и его вероятных последствий для окружающей среды, населения и экономики являются одними из наиболее актуальных вопросов как для Казахстана, так и для соседних стран Центральной Азии; ещё более острой проблемой, от которой зависит благополучие населения региона и возможности устойчивого экономического развития, является растущий дефицит воды (Котляков и Северский, 2006). Известно, что ледники являются накопителями и регуляторами водных ресурсов в различных временных масштабах, что чрезвычайно важно в условиях засушливого климата Центральной Азии. В то время как спрос на водные ресурсы увеличивается в связи с ростом населения и экономики, дефицит воды в будущем, вероятно, будет нарастать, усугубляя водный стресс (Hoelzle et al., 2019; Xenarios et al., 2019; Pritchard, 2019; Котляков и Северский, 2006). Прогнозы показывают изменения состояния снежного покрова и ускоренную деградацию ледников и многолетней мерзлоты в Центральной Азии, что подчёркивает важность оценки продолжающейся деградации криосферы и её влияния на гидрологический режим рек и других водных ресурсов в регионе, таких как подземные воды (Котляков и Северский, 2006; Hoelzle et al., 2019; Barandun et al., 2020; Haeberli, 2017).

Прошлые и текущие изменения в состоянии снежного покрова

Снежный покров — один из важнейших компонентов криосферы. В Казахстане он в значительной степени определяет режим стока рек и объём сезонных ресурсов пресной воды. В аридной зоне основная часть годового стока (до 90–95 %) рек Сарысу, Тургай, Иргиз (бассейн Аральского моря), Эмба, Сагыз и Уил (бассейн Каспийского моря) формируется весной в результате снеготаяния (Водный кадастр, 2021). В то же время среднегодовой сток Амудары и Сырдарьи достигает 72 %, по оценкам Армстронга и соавторов (Armstrong et al., 2019), основанным на методах дистанционного зондирования и моделирования. Снег влияет на баланс массы ледников, режимы промерзания и оттаивания грунта, лавинную активность (Aizen et al., 1995; Северский и соавт., 2012) и транспортную инфраструктуру (Bulletin, 2023; Information sheet #2 for ANEC, 2021). В частности, для Казахстана актуальны опасные природные явления, связанные со снегом. На обширных равнинных территориях метели продолжаются по 8–12 часов и ежегодно насчитывают 40–50 дней. Это имеет большое значение, поскольку государству приходится проектировать и эксплуатировать транспортные системы. В Казахстане протяжённость автомобильных дорог составляет более 94 тыс. км, а железных дорог — около 16 тыс. км (Bulletin, 2023; Information sheet #2 for ANEC, 2021).

Снег как форма атмосферных осадков в твёрдом виде является индикатором климатических изменений. В ряде исследований приводятся данные об изменении количества твёрдых осадков на территории Казахстана в связи с потеплением климата (Пиманкина и Такибаев, 2023; Li et al., 2020a; Li et al., 2020b; Маштаева и соавт., 2016; Aizen et al., 1995). Наблюдаемые изменения неоднородны в пространстве и времени. Например, Чжу и соавторы (Zhou et al., 2017) отмечали уменьшение продолжительности и высоты снежного покрова на Алтае, Тянь-Шане и Памире. Напротив, в работе Ли и соавторов (Li et al., 2019) приводятся данные о том, что толщина снежного покрова увеличилась на Тянь-Шане в период

с 1961 по 2014 год. По данным наземных наблюдений гидрометеорологической службы Казахстана высота снежного покрова и водный эквивалент (в. э.) снега в горах Алтая в Казахстане увеличились на 72 % во всех пунктах наблюдений за последние 30 лет (Пиманкина и Такибаев, 2021).

Согласно анализу данных маршрутных снегомерных съёмок, в бассейне реки Балдабрек (Западный Тянь-Шань) средний многолетний запас воды в снежной массе в период максимального снегонакопления (февраль) увеличился на 20 % за период 1991–2017 гг., и этот рост ещё выше по сравнению с периодом 1955–1990 гг. (рис. 4.1.1) (Пиманкина и Такибаев, 2023).

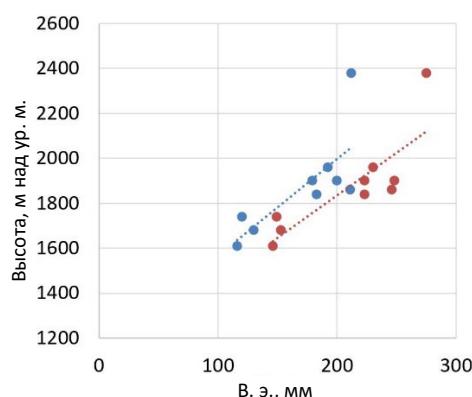


Рисунок 4.1.1. Изменение среднего многолетнего запаса воды в снеге (мм в. э.) в зависимости от высоты над уровнем моря на водосборе реки Балдабрек. Синие точки — средние значения за 1955–1990 гг. Красные точки — средние значения за 1991–2017 гг. (Источник: Пиманкина и Такибаев, 2023, модифицировано автором Пиманкиной Н. В.)

В настоящее время для изучения динамики снежного покрова широко используются спутниковые данные. Например, анализ данных радиометров MODIS и AVHRR за 28 лет позволил Дитцу и соавторам (Dietz et al., 2014) выявить сдвиг в сторону более раннего снеготаяния в горах Памира и Тянь-Шаня. Анализируя данные AVHRR с 1986 по 2008 год, Чжоу и соавторы (Zhou et al., 2017) пришли к выводу, что количество дней со снежным покровом как увеличивается, так и уменьшается в разных горных районах. Анализ с использованием сеточного архива CRU для определения изменений осадков и температуры с 1960 года в сочетании с данными MODIS и GRACE показал, что площадь снежного покрова значительно уменьшилась в Центральном Тянь-Шане и немного увеличилась в Западном Тянь-Шане (Chen et al., 2016).

Регулярный пространственный мониторинг состояния снежного покрова ведётся в Казахстане с 2000 года. Достигнуты определённые результаты в области сезонного и многолетнего мониторинга снежного покрова с использованием данных дистанционного зондирования. В исследовании Каузова и соавторов (Каузов и соавт., 2023) было установлено, что в Казахстане наблюдается небольшая и статистически незначимая тенденция к сокращению площади снежного покрова в марте и апреле. В недавнем исследовании Терехова и Абаева (Терехов и Абаев, 2023) отмечено уменьшение площади снежного покрова в Восточном Казахстане при многолетних положительных аномалиях водного эквивалента снежного покрова.

Прошлые и текущие изменения в состоянии ледников

Современное оледенение Казахстана охватывает восточную и юго-восточную часть страны и относится к хребтам Северного Тянь-Шаня, Джунгарского (Жетысуского) Алатау и Алтая. Все ледниковые системы относятся к трансграничным бассейнам (бассейны Ертиса (Иртыша), Балхаш-Алаколя, Сырдарьи, рек Чу и Талас) (рис. 4.1.2).

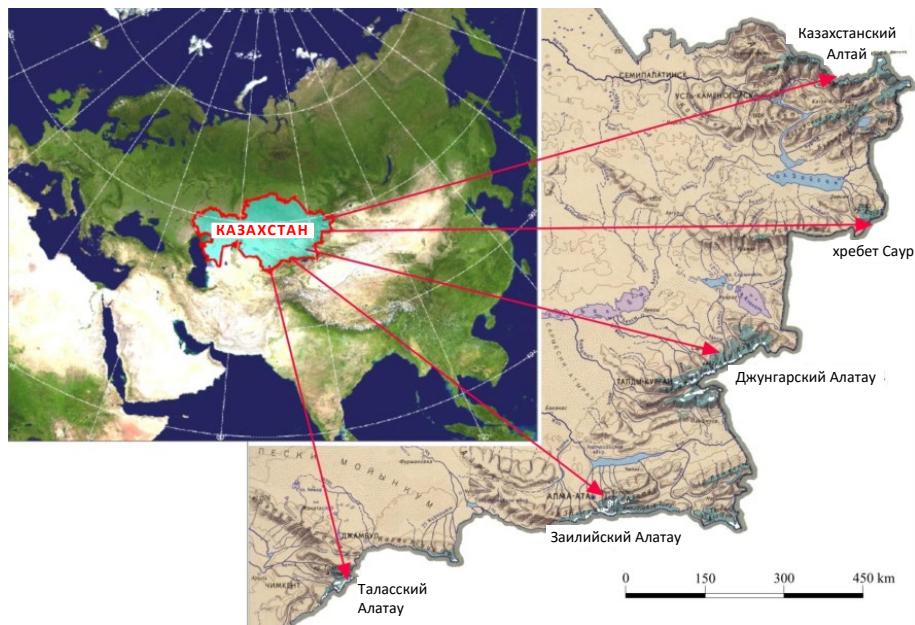


Рисунок 4.1.2. Районы оледенения Казахстана (Источник: Атлас Казахской ССР, 1982, модифицировано автором Кокаревым А. Л.)

В Казахстане насчитывается 2054 ледника общей площадью около 1032 км^2 (по данным на 2013–2015 гг.). Значительная часть оледенения расположена в Жетесуском (Джунгарском) Алатау (площадь ледников 467 км^2), наименьшая — на северном склоне хребта Саур (площадь ледника 11 км^2) (Вилесов, 2016, 2018). Сокращение площади ледников происходит во всех горных районах Казахстана, при этом темпы деградации оледенения субрегионов различны. Площадь оледенения Заилийского и Кунгейского Алатау сократилась на 35 % за период 1955–2008 гг., Жетесуского (Джунгарского) Алатау — на 43 % за период 1956–2011 гг. (Severskiy et al., 2016). Оледенение западной части Жетысуского Алатау (бассейн р. Карагат) сократилось на ~45 % за период 1956–2011/12 гг. (Усманова и Капица, 2015; Калдыбаев и соавт., 2016). Калдыбаев и Янинг (Kaldybayev & Yanning, 2022) оценили сокращение площади ледников бассейнов рек северной части Жетысуского Алатау на ~44 % с 1956 по 2013 год. Для Жетысуского Алатау Нуракынов и соавторы (Nurakynov et al., 2023) показали уменьшение площади ледника на ~49 % с 1956 по 2016 год, что близко к оценкам, полученным Северским и соавторами (Severskiy et al., 2016). Предыдущие исследования также выявили отступление ледников, например, Больх (Bolch, 2007) оценил уменьшение площади ледников в бассейнах рек Заилийского и Кунгейского Алатау на 32 % в период с 1955 по 1999 год; Нарама и соавторы (Narama et al., 2006) показали сокращение площади ледников Заилийского и Кунгейского Алатау на 12 % в период с ~1970 по 2000 год и на 4 % в период с 2000 по 2007 год. Площадь оледенения бассейнов рек Чарын и Текес (казахстанская часть) в Терскейском Алатау сократилась на 28 % за период 1956–2013 гг. (Усманова, 2014; Усманова и соавт., 2016). С 1950 по 2011 год площадь оледенения в казахстанской части Алтая сократилась на $33,2 \text{ км}^2$ (46,5 %) — с 71,4 до $38,19 \text{ км}^2$, по оценкам Вилесова, Северского и Морозовой (Вилесов, Северский и Морозова, 2014). В Южном Казахстане оледенение сосредоточено в бассейнах рек Мерке, Арысь, Асса и Майдантал. Из-за небольших размеров ледников наибольшее сокращение площади наблюдается в бассейнах рек Мерке и Асса — 54 % и 52 %, с 8,9 до $4,1 \text{ км}^2$ и с 5,4 до $2,6 \text{ км}^2$, соответственно, за период 1955–2015 гг. (Вилесов, 2016). В бассейнах рек Арысь и Майдантал площадь оледенения за тот же период сократилась с 35,3 до $21,6 \text{ км}^2$ и с 49,8 до $35,1 \text{ км}^2$, соответственно (Вилесов, 2016). Муканова и соавторы (Муканова и соавт., 2023, на рецензировании) оценили изменение площади оледенения на северном склоне Заилийского Алатау с 1955 по 2022 год на -140 км^2 или -49 %.

Основоположником гляциологических исследований в Казахстане является С. Е. Дмитриев, который в 1896 году изучал ледники Жетысуского (Джунгарского) Алатау, а в 1902–1908 гг. проводил гляциологические наблюдения на ледниках Тюксу в верховьях рек Малая Алматинка в Заилийском Алатау и Чилик в Заилийском и Кунгейском Алатау. Целенаправленные научные исследования по проблемам гляциологии начались в послевоенный период с 1947 года под руководством Н. Н. Пальгова. С 1950-х годов гляциологические исследования режима и баланса массы ледников проводились по программам Международного геофизического года 1957–1959 гг. и Международного гидрологического десятилетия 1965–1974 гг., и затем были продолжены в рамках Международной гидрологической программы, которая действует и сегодня под эгидой ЮНЕСКО. В этот период были начаты гляциологические исследования на ледниках северного и южного склонов Заилийского Алатау (Северный Тянь-Шань), южного склона Катунского хребта (Казахстанский Алтай), северо-центрального хребта Малобасканского отрога (Северный Жетысуский Алатау) (Вилесов и Федулов, 1968; Макаревич и Федулов, 1968; Макаревич и соавт., 1969; Федулов и Шульц, 1989; Макаревич, 1964а; Макаревич, 1964б; Макаревич и Шабанов, 1965; Токмагамбетов и соавт., 1977; Черкасов, 2004; Ahmetova et al., 1998; Северский и соавт., 2008; Котляков и Северский, 2006). В 1980–1990-х гг. по разным причинам наблюдения на леднике были прекращены, и, к сожалению, мониторинг баланса массы на леднике Шумского так и не был возобновлён. С временным рядом баланса массы в 24 года он, наряду с ледником Центрального Тюкса, был одним из наиболее тщательно отслеживаемых ледников, очень подробные наблюдения на котором проводились в 1960–70-е годы (Котляков и Северский, 2006).

В настоящее время непрерывные измерения баланса массы ведутся только для эталонного ледника Центральный Тюксу (Тюксу), бассейн реки Малая Алматинка, Заилийский Алатау. Программа мониторинга баланса массы Центрального Тюкса, начатая в 1957 году, включает регулярные измерения абляции в сезон таяния и снегомерные съёмки в конце сезона накопления с использованием сети из ~100 реек (Kapitsa et al., 2020). Ежегодные значения накопления, абляции и результирующего баланса массы предоставляются во Всемирную службу мониторинга ледников (ВСМЛ, англ. WGMS). Геодезические исследования являются частью программы мониторинга, а площадь ледника ежегодно картируется с 2006 года (Kapitsa et al., 2020). Это единственный комплексный временной ряд по региону, поэтому он имеет большое значение и уникальную ценность для международного научного сообщества. Баланс массы ледника Центрального Тюкса за период наблюдений 1958–2022 гг. в основном отрицательный, за исключением нескольких отдельных лет (рис. 4.1.3), что подтверждает продолжающуюся потерю массы и объёма и общую негативную тенденцию казахстанских ледников. За период наблюдений 1958–2022 гг. баланс массы ледника Центральный Тюксу составил –28,0 м или –0,42 м в. э. в год (Kapitsa et al., 2020; WGMS, 2023).

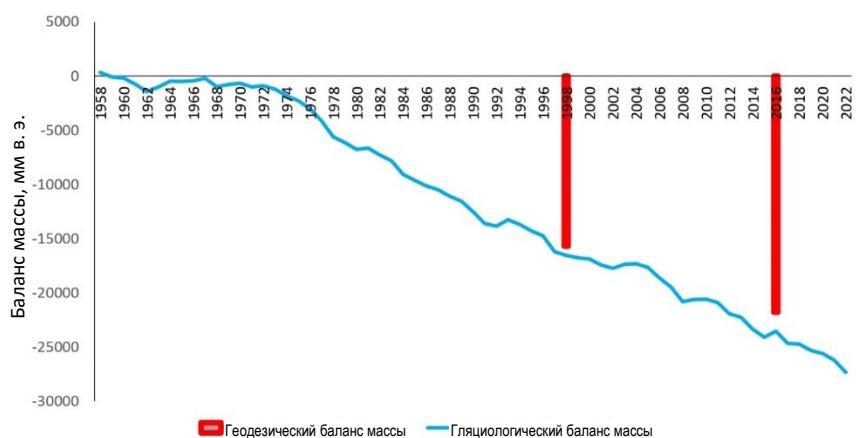


Рисунок 4.1.3. Кумулятивные гляциологические и геодезические балансы массы ледника Центрального Тюкса (мм в. э.) (Источник: составлено автором, Капицей В. П.)

Тенденции потери площади и отступания поверхности ледников группы Туюксу (р. Малая Алматинка, Заилийский Алатау) были схожи с таковыми Центрального Туюксу (Kapitsa et al., 2020; Кокарев и соавт., 2022). Поскольку эти ледники меньше Центрального Туюксу, средняя потеря площади была выше и составила 48 % в период с 1958 по 2016 год. Среднее опускание поверхности ледников группы Туюксу составило $17,8 \pm 2,2$ м; геодезический баланс за период 1958–2016 гг. составил $-20,28 \pm 2,32$ м в. э. ($-0,35 \pm 0,04$ м в. э. в год) (Kapitsa et al., 2020; Кокарев и соавт., 2022).

Результаты региональных оценок баланса массы ледников Тянь-Шаня за последние два десятилетия сопоставимы (Brun et al., 2017; Farinotti et al., 2015; Gardner et al., 2013): значения баланса массы варьируют от $-0,3$ м в. э. в год до $-0,7$ м в. э. в год. Барадун и соавт. (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 для Тянь-Шаня и Памира; показатели баланса массы для ледников Северного/Западного Тянь-Шаня и Жетысуского (Джунгарского) Алатау составили $-0,3 \pm 0,37$ и $-0,46 \pm 0,37$ м в. э. в год, соответственно. Шэн и соавторы (Shean et al., 2020) оценили геодезический баланс массы ледников Северного/Западного Тянь-Шаня и Жетысуского (Джунгарского) Алатау за период 2000–2018 гг. как $-0,27 \pm 0,09$ и $-0,49 \pm 0,16$ м в. э. в год, соответственно. Несмотря на различия в опубликованных данных о потере массы ледников, большинство исследований подчёркивают сложную и неоднородную реакцию ледников Центральной Азии, но согласны с общей потерей массы для Северного Тянь-Шаня. Учитывая количество ледников в Центральной Азии, детальные региональные данные о динамике баланса массы ледников с высоким временным разрешением всё ещё редки (Hoelzle et al., 2019; Barandun et al., 2020).

Прошлые и текущие изменения в состоянии многолетней мерзлоты

Изучение процессов и явлений, связанных с многолетней мерзлотой, важно не только для принятия рациональных инженерных решений, но и для оценки вклада мерзлоты в общий объём водных ресурсов. В горных районах Центральной Азии, где развито современное наземное оледенение, многолетняя мерзлота широко распространена. В условиях изменения климата в горах Центральной Азии и значительной деградации ледников важно иметь фактическую информацию о реакции высокогорной многолетней мерзлоты.

В настоящее время многолетняя мерзлота в Казахстане встречается только в высокогорьях (Северский и соавт., 2014). В Северном Тянь-Шане на хребте Заилийский Алатау на абсолютных высотах 2400–3350 м над уровнем моря Казахстанская высокогорная геокриологическая лаборатория проводит геотермический мониторинг мёрзлых грунтов с 1974 года (Горбунов и Немов, 1978). Для измерения температуры грунта используются термисторные датчики с точностью до $0,01$ °C. В первый период наблюдений (1974 г.) на перевале Джусалы-Кезень температура на глубине нулевых годовых амплитуд (13–17 м) в скважинах изменялась от $-0,4$ до $-0,8$ °C. Кроме того, за 20-летний период температура во всех скважинах повысилась на $0,2$ – $0,5$ °C. Изменение температурного режима многолетнемёрзлых пород в одной скважине (скважина № 1) за период с 1995 по 2018 год представлено на рисунке 4.1.4 (Северский, 2019).

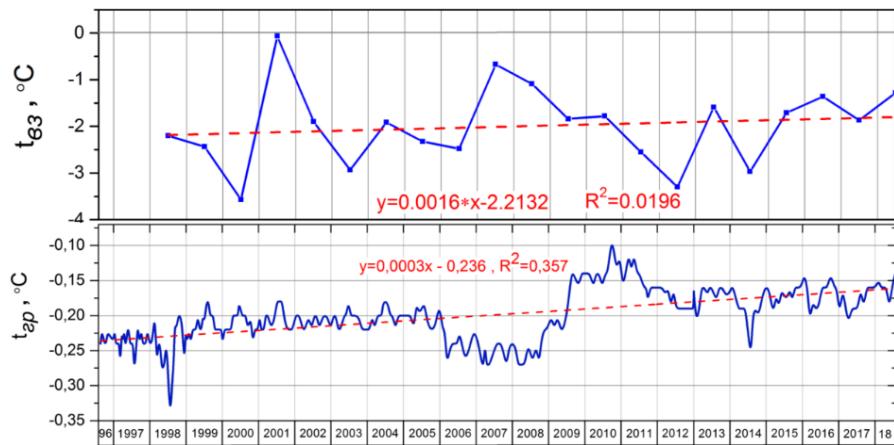


Рисунок 4.1.4. Вверху: изменение температуры воздуха (t_{B3}), внизу: подповерхностная температура (t_{rp}) в одной из скважин на глубине 20 м (скважина № 1). (Источник: Северский, 2019)

С 1995 по 2010 год температура мерзлоты на разных глубинах (10, 15, 20, 25 м) сохранялась в диапазоне от $-0,2$ до $-0,25$ $^{\circ}\text{C}$ с незначительными колебаниями (до $0,1$ $^{\circ}\text{C}$), но во второй период после 2011 года температура почвы повысилась до диапазона от $-0,2$ до $-0,15$ $^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.1.5). В целом за 44 года наблюдается слабое потепление ($0,01$ $^{\circ}\text{C}$ в год) температурного режима многолетней мерзлоты (Северский, 2019).

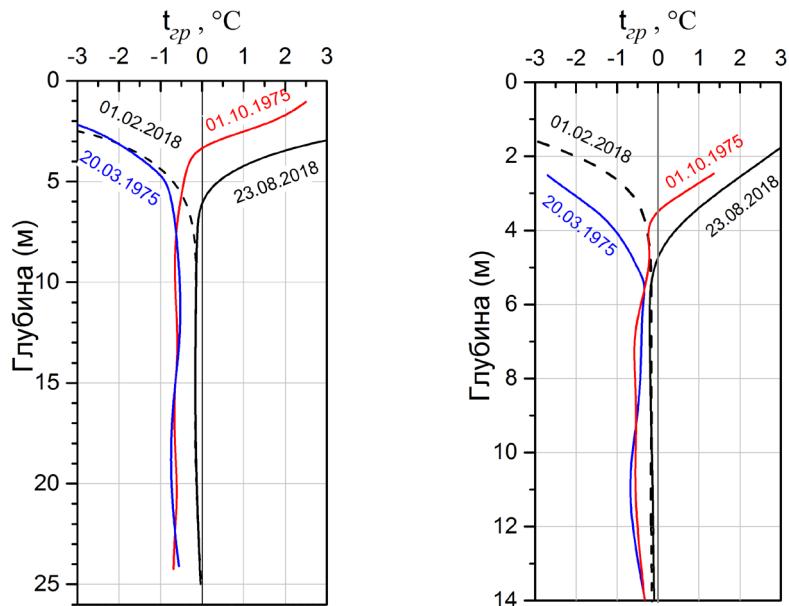


Рисунок 4.1.5. Динамика температуры грунта (t_{rp}) по глубине (ось Y) в скважине № 1 (слева) и скважине № 2 (справа) на перевале Джусалы-Кезень. Деятельный слой увеличился в скважине № 1 примерно с 3 м до 6 м, а в скважине № 2 примерно с 3,75 м до 4,4 м за период с 1975 по 2018 год (Источник: Северский, 2019)

В 2013 году на перевале Джусалы-Кезень были проведены геофизические исследования на участках с естественными условиями и на застроенных территориях. Результаты исследований показали, что при изменении экспозиции склона с севера на юг происходит закономерное изменение типа распределения пластов мёрзлых грунтов. Сплошные толщи мёрзлых грунтов на склоне северной экспозиции характеризуются высокими (4500–11 000 Ом·м) значениями удельного электрического сопротивления и толщиной около 100 м. На южном склоне, по данным бурения, толща мёрзлых грунтов отсутствует, что подтверждается низкими значениями удельного сопротивления (780–1600 Ом·м) (Северский, 2019; Северский и соавт., 2014). Это позволило выявить влияние на структуру многолетнемёрзлых толщ

природных и антропогенных локальных факторов, экспозиции склонов, тектоники, разогревающего и охлаждающего воздействия фундаментов зданий (Северский, 2019). Геофизические работы, проведённые на перевале Джусалы-Кезень методом зондирования становлением поля в 2017 году, свидетельствуют о наличии многолетней мерзлоты на глубинах 15–40 м, что подтверждается данными термометрии в близлежащей скважине (Желтенкова и соавт., 2020).

Многолетняя мерзлота и грунтовый лёд могут содержать большое количество пресной воды в твёрдом виде и участвовать во вкладе талых вод в общий объём речного стока. Наибольшие запасы многолетнемёрзлых льдов в регионе содержатся в горных ледниках, моренах и слоях камнепадов. По результатам работы Горбунова и соавторов (Горбунов и соавт., 2018), запасы подземного льда в Северном Тянь-Шане оцениваются в 56 км³, что составляет 62 % от объёма ледников. Установлено, что наибольшие объёмы подземного льда содержатся в активных каменных глетчерах. Картографирование и дистанционный мониторинг, измерение скоростей движения горных ледников, описание их внутренней структуры и картирование ландшафтных особенностей горных ледников отражены во многих работах (например, Горбунов, 1979; Горбунов и Титков, 1989; Kokarev et al., 1997; Bolch & Marchenko, 2009; Bolch & Gorbunov, 2014; Sorg et al., 2015; Kääb et al., 2021). Тем не менее, мониторингу многолетней мерзлоты и мерзлотным исследованиям в регионе пока уделяется мало внимания, и необходимы более систематические исследования для 1) более точной количественной оценки содержания льда, 2) картирования внутренней структуры различных мерзлотных форм рельефа, 3) понимания динамической реакции мёрзлых грунтов на изменение климата и 4) понимания роли деградации мерзлоты в гидрологическом цикле.

Заключение

Наземные наблюдения сыграли важную роль в анализе динамики снежного покрова, а данные дистанционного зондирования позволили оценить изменения в общем снежном режиме Казахстана. За последние 65 лет горное оледенение в Казахстане сократилось примерно на 43 % по площади и на 65 % по объёму. Ледники в Заилийском Алатау сократились примерно на 65–75 % с середины XIX века. Кроме того, мониторинг температуры грунта в скважинах показывает значительное повышение температуры в районах многолетней мерзлоты, с заметным трендом роста на 0,01 °C в год за период 1974–2018 гг. Эта тенденция потепления также наблюдается в высокогорных метеорологических данных: среднегодовая температура воздуха повышается на 0,2 °C в 10 лет. Если эти тенденции сохранятся, ожидается, что в ближайшие 20–30 лет высокогорная многолетняя мерзлота будет демонстрировать почти безградиентный характер термического режима с близкими к нулю температурами. Аналогичным образом, к 2050 году площадь ледников может сократиться на треть по сравнению с нынешней, но полностью они не исчезнут до конца этого века.

4.2. Изменения в криосфере Кыргызстана

Руслан Кенжебаев^a, Тамара Матис^b, Томас Сакс^b, Серикжан Атанов^b, Мартина Барапун^b

^a Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызстан

^b Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

Введение

В Центральной Азии Кыргызстан отличается развитым оледенением. Располагаясь внутри Евразийского континента, вдали от океанов и в зоне умеренных широт, он занимает большую часть западной части Тянь-Шаня, а также части северной и восточной периферии Памиро-Алая. Более половины территории Кыргызстана (56,9%) расположено на высотах более 2500 м над уровнем моря и почти четверть (23,0 %) — выше 3500 м над уровнем моря (Усубалиев и соавт., 2021). Почти все горные хребты

Кыргызстана в большей или меньшей степени покрыты ледниками. Ледниковые системы горных хребтов Кыргызстана являются не только элементом альпийского ландшафта, но и значительными резервуарами пресной воды. Таким образом, ледники играют важнейшую роль в процессе формирования речного стока. Их снежно-ледовые ресурсы высвобождаются в тёплое время года. Их роль всё возрастает, особенно в засушливые годы ледники становятся единственным источником поступления воды в реки, тем самым обеспечивая водными ресурсами нижележащие долины и равнины (Усубалиев и соавт., 2021).

Сложный орографический рельеф Кыргызстана оказывает большое влияние на формирование многолетней мерзлоты, ледников и разнообразное распределение снежного покрова.

Данные о максимальных запасах воды в снежном покрове играют чрезвычайно важную роль в решении многих практических вопросов на территории Кыргызстана: прогнозирование водообеспеченности орошающего земледелия, оценка возможности развития опасных паводков и селей при быстром таянии снега весной, определение сугробовых нагрузок на объекты инфраструктуры, эксплуатация дорог. Горная многолетняя мерзлота может содержать большие участки льда в верхних слоях коренных пород или крупные линзы вечномерзлого льда, являющиеся значительным компонентом покрытых крупными обломками зон, таких как каменные глетчеры или осипные склоны. Многолетняя мерзлота может встречаться и на плоских или пологих склонах. Таяние многолетней мерзлоты представляет собой значительную опасность и может иметь серьёзные последствия для людей и окружающей среды. Например, при оттаивании многолетней мерзлоты, заполненной льдом, она может превратиться в грязную жижу, не способную выдержать вес почвы и растительности над ней. При оттаивании многолетней мерзлоты может пострадать инфраструктура, например, дороги и здания.

Прошлые и текущие изменения в состоянии снежного покрова

Кыргызстан — страна Центральной Азии с богатыми ресурсами подземных и поверхностных вод. Изменения в режиме стока и распределения водных источников, талых вод, ледников и других источников водного питания, влияют на обеспеченность Кыргызстана водой. Сток талых вод является важным источником водных ресурсов для Кыргызстана. Кроме того, особенно в горных районах, часто регистрируются наводнения, вызванные таянием снега, которые представляют серьёзную угрозу для природных и социально-экономических систем. Для уменьшения несчастий и потерь от наводнений очень важно всесторонне анализировать закономерности таяния снега и потенциальные паводковые процессы.

В зависимости от орографических условий и характера распределения снежного покрова в стране выделяют четыре зоны (Маматканов и соавт., 2006):

1. Зона постоянного снежного покрова расположена в пределах высокогорной (нивальной) зоны на высотах от 3200 до 4800 м над уровнем моря и выше. Площадь этой зоны относительно невелика.
2. Зона устойчивого снежного покрова расположена ниже линии многолетнего снега (от 3200 до 1500 м над уровнем моря) и занимает значительную площадь. Продолжительность снежного покрова составляет от 3 до 6 месяцев, сокращаясь с уменьшением высоты над уровнем моря.
3. Зона неустойчивого снежного покрова занимает высоты от 600 до 1500 м над уровнем моря, включая предгорья и прилегающие долины. В эту зону также входят некоторые высокогорные районы (сырты), где зимой выпадает очень мало осадков.
4. Зона отсутствия снежного покрова. Сюда входят Кочкорская впадина и западная часть Иссык-Кульской котловины, где выпадает очень мало снега.

Распределение снежного покрова по территории, продолжительность его залегания и запасы воды в снеге к началу зимнего сезона крайне неравномерны и зависят от климатических и орографических факторов. В горах создаются благоприятные условия для выпадения обильных осадков, длительного сохранения и накопления снега, что оказывает огромное влияние на динамику горных ледников, температурный режим многолетней мерзлоты и формирование речного стока.

Существует мало исследований, посвящённых долгосрочным тенденциям и краткосрочной изменчивости снежного покрова в Центральной Азии. Недавние исследования в регионе Центральной Азии показывают изменения в характере осадков от снега к дождю. 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. Они также пришли к выводу, что количество дней со снежным покровом за этот период уменьшилось на 9 дней. Глазырин (Глазырин, 2009) проанализировал продолжительность снежного покрова на станциях Ойгаинг и Ташкент, начиная с 1930-х годов, и отметил небольшие негативные тенденции, которые, однако, не были статистически значимыми. Царёв (Царёв, 2006) проанализировал данные о высоте снежного покрова, осадках и температуре, чтобы оценить, как изменение климата влияет на максимальное накопление снега в горах Центральной Азии на основе соотношения режимов температуры и осадков. Согласно его результатам, сценарии повышения температуры на 2 °C и уменьшения количества осадков на 30 % приведут к уменьшению запасов воды в снежном покрове примерно на 30 % в марте, когда накопление снега достигает максимума.

В последние годы средства дистанционного зондирования стали важным источником данных для наблюдений за состоянием снежного покрова. За последние три десятилетия стали доступны средства дистанционного наблюдения за снежным покровом, особенно в отдалённых районах, таких как горные районы Центральной Азии. Данные визуализирующего спектрорадиометра среднего разрешения (MODIS) и усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения (AVHRR) широко используются для оценки запасов воды в Центральной Азии. Гафуров и соавторы (Gafurov et al., 2013) оценили качество данных MODIS о снежном покрове в сравнении с наблюдениями в ручном режиме на станциях Центральной Азии и сообщили о точности около 93 %. Однако облачность препятствует эффективному использованию оптического дистанционного зондирования в гидрологических исследованиях (Gafurov & Bårdossy, 2009). Исследование Петерса и соавт. (Peters et al., 2015) показало для Таримского бассейна сокращение снежного покрова на более низких высотах (<3600 м над уровнем моря), а также выявило свидетельства увеличения продолжительности снежного покрова на более высоких высотах (>5000 м над уровнем моря), что также подтверждается некоторым анализом измерений многолетних объёмов снегозапасов на леднике Абрамова на Памиро-Алае (Kronenberg et al., 2021). В районах с сокращением продолжительности снежного покрова и уменьшением доли снежных осадков накопление снега на ледниках в зимний период приведёт к отрицательному изменению баланса массы. Кроме того, изменение режима снежного покрова и значительное сокращение площади ледников вызывают изменения в местном гидрологическом цикле, влияя на речной сток и запасы подземных вод. Меньшее количество осадков в виде снега приводит к более раннему таянию снега, что в конечном итоге может привести к смещению пиковых расходов и речного стока на более ранние периоды года, а не на летние, когда потребность в воде наиболее высока (Tomaszewska & Henebry, 2018).

Прошлые и текущие изменения в состоянии ледников

Ледники в горах Центральной Азии, как и во всём мире, сильно деградируют с разной скоростью уменьшения площади в зависимости от региона. Изучение и мониторинг ледниковых систем

Центральной Азии в условиях преобладания аридного климата на большей части её территории и современного продолжающегося глобального потепления становится всё более актуальным.

В настоящее время из-за продолжающегося глобального потепления ледники деградируют, что выражается в уменьшении их площади и объёма. Примерно за 70-летний период площадь оледенения в Кыргызстане сократилась в среднем на 16 % (Усубалиев и соавт., 2021). Площадь крупных ледников сократилась на 17 %, а площадь небольших ледников увеличилась в два с половиной раза (245 %). По данным Каталога ледников СССР, площадь оледенения в 1960-х годах составляла 8108 км² (ледники размерами <0,1 км²). Согласно недавней оценке ледников, их площадь составляет 6683,9 км², а объём — 530 км³ по состоянию на 2016 год, что свидетельствует о сокращении площади и объёма на 18,5 % (Усубалиев и соавт., 2021).

Наиболее объективным показателем состояния ледников и их эволюции являются многолетние данные о балансе массы ледников. В советское время, в 1950–1960-е годы, на Тянь-Шане и Памире была развёрнута комплексная система криосферного мониторинга. Однако после распада СССР в середине 1990х годов большинство программ мониторинга резко прекратились (Barandun et al., 2019). С 2010 года была создана новая сеть мониторинга ледников (рис. 4.2.1), и первоначально четыре ледника были отобраны для долгосрочного мониторинга группой исследователей из Кыргызстана, Германии и Швейцарии в рамках проектов «Вода в Центральной Азии» (Central Asian Water, CAWa), «Наращивание потенциала и партнёрство для укрепления систем наблюдения за климатом» (Capacity Building and Twinning for Climate Observing Systems, CATCOS), «Наблюдения за климатом и криосферой для лучшей адаптации» (Cryospheric Climate Services for improved Adaptation, CICADA) и «Криосферные наблюдения и моделирование для улучшения адаптации в Центральной Азии» (Cryospheric Observation and Modelling for improved Adaptation in Central Asia, CROMO-ADAPT). С тех пор гляциологические измерения проводятся постоянно. В настоящее время в Кыргызстане мониторинг баланса массы ледников охватывает ледниковые системы Северного, Внутреннего, Центрального Тянь-Шаня и Иссык-Кульской котловины. К ним относятся следующие ледники: № 354, расположенный на северо-западном склоне хребта Акшийрак; Батыш-Соок, расположенный на северном склоне хребта Джетимбель (Внутренний Тянь-Шань); Голубина (бассейн реки Ала-Арча, северный склон хребта Киргизский Алатау); Абрамова, расположенный на южном склоне Алайского хребта; № 599, расположенный на южном склоне хребта Кунгейский Алатау, и Кара-Баткак и Тургень-Аксу на северном склоне хребта Тескейский Алатау в Иссык-Кульской котловине.

В рамках различных исследований с помощью моделирования были получены наборы данных по текущему балансу массы для конкретных ледников. Азисов и соавторы (Азисов и соавт., 2022) провели исследование годового баланса массы ледника Голубина за период с 1900/1901 по 2020/2021 год (рис. 4.2.2). Полученные ими данные свидетельствуют об изменении баланса массы за этот период на $-0,16 \pm 0,45$ м в. э. в год.

На ледниках Батыш-Соок и № 354, расположенных во Внутреннем Тянь-Шане (рис. 4.2.1), был проведён и продолжен анализ баланса массы ледников, результаты опубликованы в работах Кроненберга и соавторов (Kronenberg et al., 2016) и Кенжебаева и соавторов (Kenzhebaev et al., 2017). Модель распределённого накопления и таяния льда по температурному индексу (Hock, 1999; Huss et al., 2009), использованная для экстраполяции точечных измерений с 2011 по 2021 год, была применена для реконструкции баланса массы с 2004 по 2010 год (рис. 4.2.3). Для ледника Батыш-Соок за период с 2003/04 по 2020/21 год был получен среднегодовой баланс массы $-0,61$ м в. э. в год, а для ледника № 354 — $-0,58$ м в. э. в год. Современные прямые измерения показали, что в период с 2011 по 2016 год потери массы наблюдаемых ледников в Кыргызстане составили от $-0,25$ до $-0,51$ м в год. Реконструированные балансы массы подтвердили эту негативную тенденцию за последние несколько

десятилетий, показав, что те же ледники теряли от $-0,30$ до $-0,43$ м в. э. в год с 2000 по 2014 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; Азисов и соавт., 2022). Как показывают долгосрочные временные ряды баланса массы, для всех наблюдаемых ледников наблюдается общая отрицательная тенденция баланса массы. Это означает, что аблационная часть ледника превышает величину ледниковой аккумуляции. Однако в отдельные гидрологические годы наблюдается и положительный баланс, что связано в первую очередь с благоприятными погодно-климатическими условиями и расположением того или иного ледника в горной системе. Несмотря на значительную удалённость рассматриваемых ледников друг от друга на территории Кыргызстана и различия в топографических и климатических условиях, в долгосрочном изменении их баланса массы наблюдается синхронность. Отступание ледников усиливается, но с разной скоростью, что приводит к значительному сокращению размеров ледников, но характеризуется неоднородной реакцией ледников (Barandun et al., 2021). Размеры ледников быстро уменьшаются не только по длине и площади, но и происходит истончение поверхности ледников. При этом сокращению подвергается не только зона аблации, но и некоторые участки зоны аккумуляции. В последние годы снеговая линия выходит за пределы максимальных высот хребта, за исключением некоторых самых высоких уровней (Усубалиев и соавт., 2021).



Рисунок 4.2.1. Карта ледников Кыргызстана, где, начиная с 2010 года, исследования были постепенно возобновлены. Красным обозначены ледники, исследуемые в рамках проектов CATCOS, CICADA, CROMO-ADAPT и CAWa, а синим — ледники, охваченные другими проектами. (Источник: Hoelzle et al., 2017)

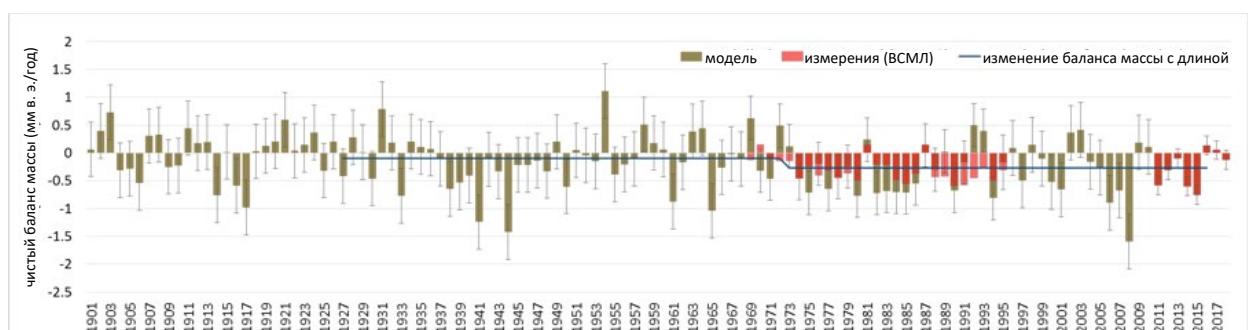


Рисунок 4.2.2. Смоделированные (зелёные столбики) и измеренные (красные столбики) временные ряды баланса массы с полосами ошибок, описывающими неопределенность баланса массы. Синяя

линия показывает изменение баланса массы, полученное на основе наблюдений за изменением длины ледников за два периода (1927–1972 гг., 1972–2016 гг.). (Источник: Азисов и соавт., 2022)

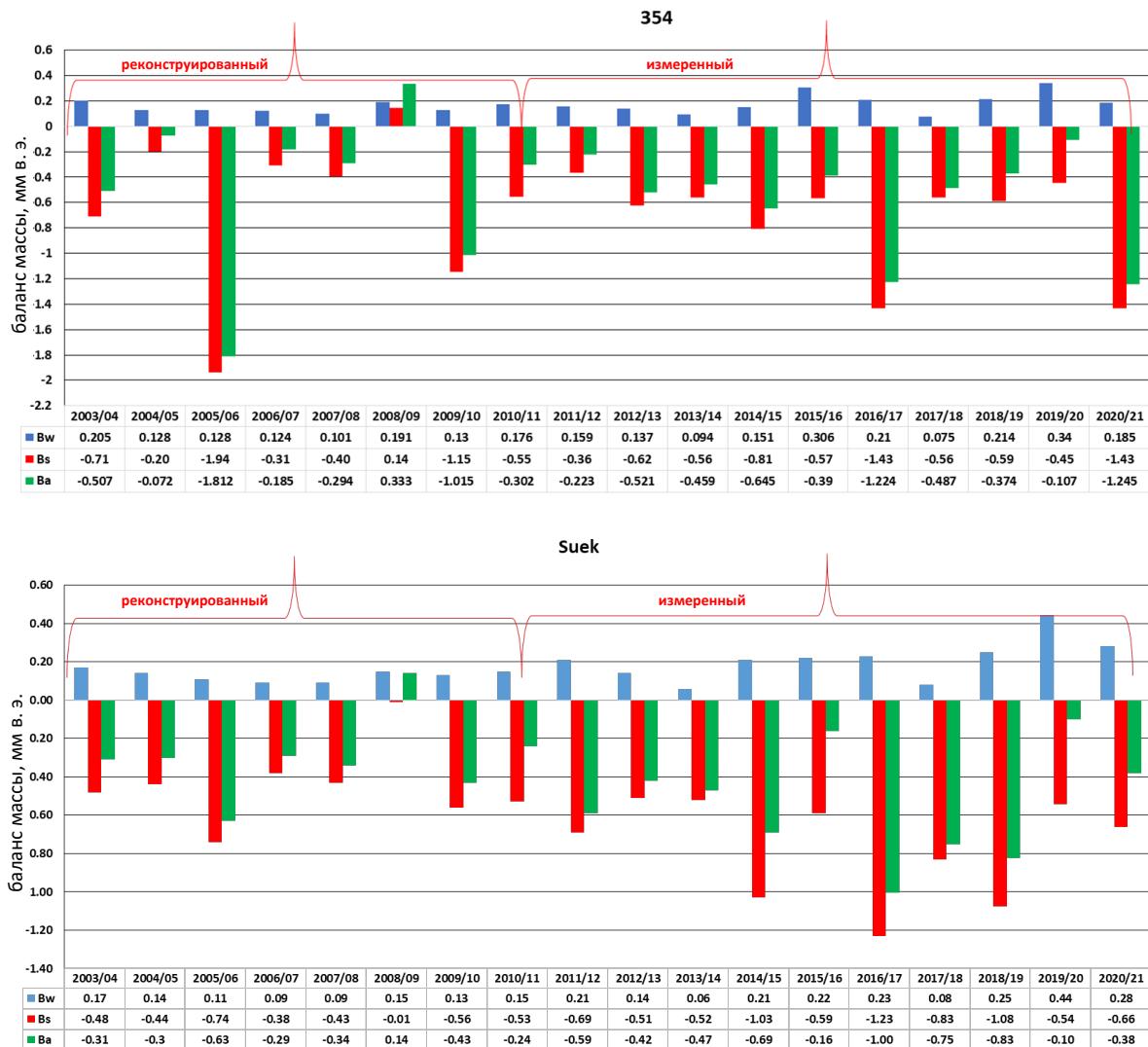


Рисунок 4.2.3. Реконструированный (2003/04–2009/10) и измеренный (2010/11–2020/21) летний баланс (Bs, красный), зимний баланс (Bw, синий) и годовой баланс массы (Va, зелёный).

Использовались значения, полученные с помощью метода распределённого накопления и простого энергетического баланса на основании данных Oerlemans, 2001.

Прошлые и текущие изменения в состоянии многолетней мерзлоты

Многолетняя мерзлота широко распространена в высокогорьях на высотах более 3500–4000 м над уровнем моря. В целом площадь многолетней мерзлоты оценивается примерно в 64 тыс. км², что составляет 3,4 % территории Кыргызстана. С конца Малого ледникового периода многолетняя мерзлота Тянь-Шаня испытывает непрерывное потепление вплоть до настоящего времени (Марченко и соавт., 2007). Измерения температуры грунта проводились в 20 скважинах в массиве Акшийрак (42° с. ш., между 4000 и 4200 м над уровнем моря) и более чем в 25 скважинах в долине Кумтор (между 3560 и 3790 м над уровнем моря). На горном хребте Акшийрак на высотах 4100–4200 м над уровнем моря самая низкая измеренная температура грунта составила –5 °C в коренных породах (палеозойский сланец) и –6,7 °C в богатых льдом позднеплейстоценовых моренах. Измеренная толщина многолетней мерзлоты составила 350–370 м и 250–270 м, соответственно (Ермолин и соавт., 1989; Горбунов и соавт.,

1996). Средняя толщина деятельного слоя по всем измеренным участкам увеличилась на 23 % по сравнению с началом 1970-х годов (Марченко и соавт., 2007). Как показано на рис. 4.2.4, в 2022 году на Акшийраке (Кыргызстан) был установлен новый регистратор температуры. Он показывает, что температура многолетней мерзлоты на глубине 20 м увеличилась примерно на +0,9 °C с 1986 года.

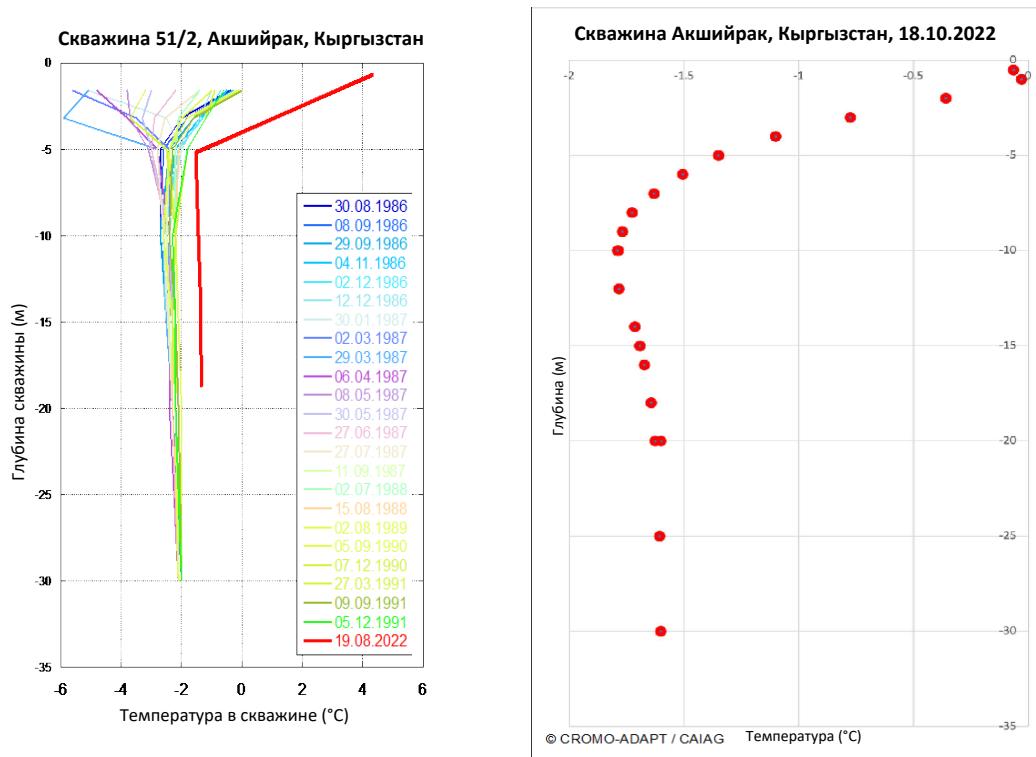


Рисунок 4.2.4. Наблюдения за скважинной температурой с 1986 по 1991 год и в 2022 году на Акшийраке, Кыргызстан, показывают явное подповерхностное потепление. (Источник: проект CROMO-ADAPT, Фрибурский университет)

Многолетняя мерзлота имеет гидрологическое значение для Кыргызстана и оказывает значительное влияние на экономическую деятельность. Будущая деградация многолетней мерзлоты также является потенциальным источником опасных явлений в горных районах, что обостряет настоятельную необходимость в постоянном и устойчивом мониторинге горной криосферы. Потепление горных склонов дестабилизирует многолетнюю мерзлоту, в первую очередь за счёт снижения механической прочности, что потенциально может привести к различным типам движения масс, таким как селевые потоки, горные лавины или, в случае моренных плотин с ледяным ядром, наводнения в результате прорыва ледниковых озёр. Движение масс — сложное явление, и хотя деградация многолетней мерзлоты, вызванная изменением климата (наблюдаемая на объектах Глобальной сети мониторинга криолитозоны (Global terrestrial Network on Permafrost, GTN-P) в Тянь-Шане, например (Марченко и соавт., 2007)), может быть ключевым фактором таких событий, нелегко отделить климатический сигнал от обычных эрозионных процессов в горных районах. Однако появляется всё больше свидетельств того, что в условиях быстрого потепления высокогорных районов следует ожидать увеличения числа случаев термоиндуцированной неустойчивости склонов (Barandun et al., 2020). Из-за высокой потенциальной энергии, присущей крутым поверхностям, и возможности возникновения сложных явлений, связанных с источниками влаги (ледниковый лёд, снег или вода), последствия движения масс могут быть далеко идущими и затрагивать население на многие километры вниз по склону.

Заключение

Водные ресурсы в засушливых континентальных районах Центральной Азии в значительной степени зависят от криосферных компонентов, таких как снежный покров, ледники и многолетняя мерзлота (Hoelzle et al., 2019). Криосфера Центральной Азии претерпевает значительные изменения, вызванные изменением климата. Это может иметь серьёзное влияние на водообеспеченность региона в ближайшем будущем, особенно при сценариях с более высоким уровнем выбросов. Засушливые летние месяцы в Центральной Азии соответствуют пику вегетационного сезона и, соответственно, спроса на воду. Таяние снега и льда является источником водных ресурсов в этот период. В частности, таяние ледников становится важным резервом пресной воды во время засух (Pohl et al., 2017; Pritchard, 2019; Barandun et al., 2020). Горы Тянь-Шаня и Памира в Кыргызстане выступают в роли «водонапорных башен» для Центральной Азии (Ibatullin & Ziganshina, 2019; Immerzeel et al., 2010; Kaser et al., 2010). Криосферные компоненты этих горных систем хранят значительные объёмы воды в твёрдой форме, что имеет решающее значение для нынешней и потенциальной водообеспеченности и управления водными ресурсами в условиях меняющегося климата.

4.3. Изменения в криосфере Таджикистана

Мартина Барандун^a, Тамара Матис^a, Хусрав Кабутов^b, Мартина Барандун^b, Абдулхамид Каюмов^b, Томас Сакс^a, Серикжан Атанов^b

^a *Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария*

^b *Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана», Душанбе, Таджикистан*

Введение

Криосфера Таджикистана — это уникальный горный ресурс, который крайне уязвим перед будущими климатическими и социальными изменениями (Immerzeel et al., 2020). Горы Памира в Таджикистане являются основным трансграничным источником стока для Амударьи, что приводит к регулярным конфликтам по поводу распределения воды (De Stefano et al., 2017) и неустойчивому управлению водными ресурсами (Micklin, 2010). При том, что Таджикистан использует лишь до 20 % собственных ресурсов пресной воды, криосфера Таджикистана поставляет значительное количество воды главным образом в Узбекистан и Туркменистан. Таяние ледников и многолетнего снега являются основными источниками пресной воды в бассейне Аральского моря (Махмадалиев и соавт., 2008). В то время как таяние снега обеспечивает до 70 % общего годового стока (Armstrong et al., 2019; Kraaijenbrink et al. 2021), ледники Высокогорной Азии выделяют талую воду, которая удовлетворяет потребности в воде 250 миллионов человек в сухой летний сезон (Miles et al., 2021; Pohl et al., 2017; Pritchard et al., 2019). Памир является крупным центром современного оледенения с уникальной временной и пространственной изменчивостью (Kraaijenbrink et al., 2017; Scherler et al., 2011; Shean et al., 2020; Wang et al., 2019; Barandun et al., 2021; Barandun & Pohl, 2023) из-за гетерогенной климатической обстановки и чувствительности к колебаниям климата (Sakai and Fujita, 2017).

Самые ранние сведения о криосфере на территории Таджикистана относятся к концу XIX – началу XX веков, когда различные исследователи посещали высокогорные районы Центральной Азии (Mergili et al., 2012). Полномасштабные исследования начались в 1946 году, и с целью каталогизации ледников путём визуального осмотра на вертолётах были проведены аэрофотосъёмки, а в 1971 году — дешифрирование сделанных аэрофотоснимков (Каталог ледников СССР, 1975). В советский период систематическое картирование ледников Таджикистана проводилось в 1968–1973 гг. в рамках Всесоюзной программы по инвентаризации ледников (Котляков, 1980). После распада СССР, начиная с 1990-х годов, из-за труднодоступности мест исследований и высокой стоимости полевых работ,

гляциологические исследования резко сократились (Каюмов и соавт., 2022). Криосферные исследования в Таджикистане начинают постепенно возрождаются (Lv et al., 2019; Hoelzle et al., 2019; Barandun et al., 2020).

Прошлые и текущие изменения в состоянии снежного покрова

Постоянная сеть снегомерных реек была создана в 1960-х годах и снегомерные съёмки проводились ежегодно до 1990 года (в некоторые годы ежемесячно; Bedford and Tsarev, 2001). К сожалению, деятельность по мониторингу была прервана с распадом СССР и возобновилась лишь недавно Агентством Ага Хана по вопросам среды обитания (АКАН) и Таджикгидрометом (Bair et al., 2020). Гулахмадов и соавторы (Gulakhmadov et al., 2023) использовали наборы долгосрочных исторических данных по бассейну реки Варзоб в Таджикистане для оценки статистических тенденций и изменений величины температуры воздуха, осадков и снежного покрова в Анзобском (в верхнем течении), Майхурском (в среднем течении) и Хушёрском (в нижнем течении) районах бассейна реки Варзоб. Результаты показали тенденцию к снижению среднемесячной температуры воздуха на станции Анзоб в верхнем течении для всех месяцев, кроме января, февраля и декабря, в период с 1960 по 2018 год и с 1991 по 2018 год. Количество сезонных осадков показало значительную тенденцию к увеличению в январе и феврале на станции Анзоб с 1960 по 2018 год, но значительную тенденцию к уменьшению в апреле в верхнем, среднем и нижнем течении в период с 1960 по 1990 год и с 1991 по 2018 год. Почти на всех станциях наблюдалась тенденция к уменьшению годового количества осадков в оба периода, в то время как в верхнем течении наблюдалась незначительная тенденция к увеличению в период с 1960 по 1990 год. Помесячный анализ состояния снежного покрова в бассейне реки Варзоб по наземным данным показал, что максимальное увеличение снежного покрова произошло в апреле на станции Анзоб (178 см) и в марте на станциях Майхура (138 см) и Хушёри (54 см). Тест Манна-Кендалла по данным MODIS показал, что с 2001 по 2022 год месячный снежный покров в бассейне реки Варзоб увеличивался в апреле и июле, а в феврале, сентябре, ноябре и декабре наблюдалось его уменьшение. В марте, мае, августе и октябре наблюдалась стабильная картина и, соответственно, отсутствие тренда (Gulakhmadov et al., 2023).

Смит и Букхаген (Smith and Bookhagen, 2018) рассмотрели тенденции изменения водного эквивалента снега за 24 года (с 1987 по 2009 год) в высокогорной Азии, включая бассейны Амударьи и Инда, на основе данных спутникового пассивного микроволнового зондирования. По их оценкам, в большинстве районов с декабря по февраль значение водного эквивалента снега находится в диапазоне 50–100 мм, а в бассейне Амударьи — более 100 мм. Эти значения мало детализированы из-за низкой разрешающей способности спутниковых радиометров в 25 км (Bair et al., 2018, 2020). Таким образом, сведения о состоянии снежного покрова в Таджикистане остаются скучными. Благодаря новой оперативной сети наблюдения за лавинами, ежедневные снегомерные съёмки теперь доступны на нескольких оперативных метеостанциях по всему Памиру. Бэр и соавторы (Bair et al., 2020) объединили результаты этих прямых наблюдений с данными анализа и дистанционного зондирования, чтобы уточнить оценки водного эквивалента снега. Исследование показало очень неоднородное распределение характеристик снежного покрова по региону.

Данные о выпадении осадков могут дать представление о характере снежного покрова. Распределение атмосферных осадков на территории Таджикистана характеризуется значительной изменчивостью (Aalto et al., 2017). По результатам интерполяции данных станций, общее среднегодовое количество осадков варьируется от менее 50 мм до более 1000 мм. Кроме того, анализ выявил три отдельных района с относительно высоким уровнем осадков по сравнению с другими частями страны (рис. 4.3.1). Самыми сухими районами Таджикистана являются восточный Памир и юго-западные равнины, где выпадает менее 200 мм осадков в год. Самым сухим сезоном является лето, когда количество осадков лишь

местами превышает 100 мм. С другой стороны, значительная часть годовых осадков выпадает весной, причём в западных районах страны их количество превышает 400 мм (рис. 4.3.1; Aalto et al., 2017). Общее количество годовых осадков в Гиссаро-Алае велико и характеризуется сильным вертикальным градиентом. Накопление снега на леднике Абрамова, расположеннном в Алае, увеличилось с 1970-х годов (Kronenberg et al., 2021). Напротив, Ниязов и соавторы (Ниязов и соавт., 2018) обнаружили уменьшение снежного покрова в северо-восточной части Алайского хребта в период с 1940 по 2017 год. Наибольшее количество осадков выпадает в районе ледника Федченко из-за сильного барьерного эффекта западных ветров со стороны окружающих горных вершин, которые ограждают Восточный Памир. Общее количество осадков за холодный сезон (октябрь–апрель) для Восточного Памира показало снижение на 25 мм или 25 % на метеостанции Джавшангоз с 1940 по 2016 год (рис. 4.3.2; Ниязов и соавт., 2019). Аналогично, на метеостанции Булункуль за период с октября по апрель было зафиксировано уменьшение зимних осадков на 12 мм или 16 % от средних многолетних значений (рис. 4.3.2). На метеостанции Хорог количество осадков за тот же период практически не изменилось (рис. 4.3.2).

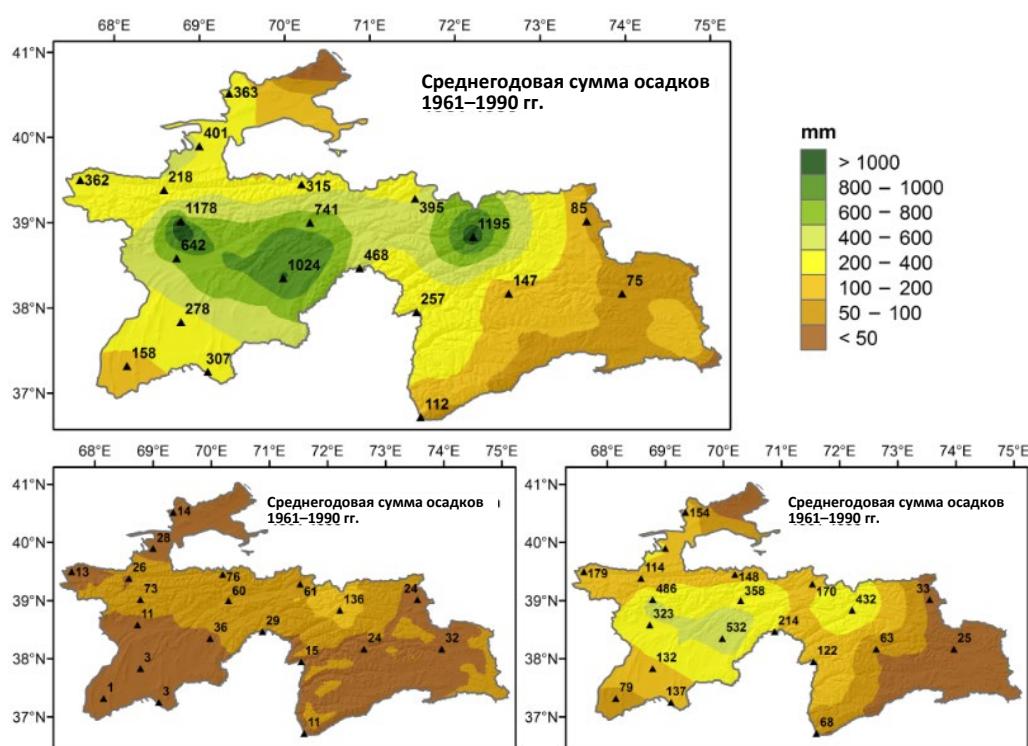


Рисунок 4.3.1. Интерполированная среднегодовая (вверху), летняя (июнь–август, самый сухой сезон, слева внизу) и весенняя (март–май, самый влажный сезон, справа внизу) сумма осадков в Таджикистане по данным наблюдений за 1961–1990 гг. Наблюдаемые величины осадков представлены только для ряда станций, а измерения в высокогорных районах немногочисленны и искажают результаты (Aalto et al., 2017).

Другим хорошим индикатором долгосрочных изменений состояния снежного покрова является высота снеговой линии в конце лета над площадью ледника в регионе. Высота снеговой линии в конце лета зависит от взаимодействия факторов количества твёрдых осадков и температуры воздуха и также является хорошим индикатором баланса массы ледника. Средняя высота снежного покрова на ледниках, полученная дистанционными наблюдениями, составила 4355 ± 134 м над уровнем моря для Западного Памира и 5050 ± 35 м над уровнем моря для Восточного Памира в период с 1998 по 2013 год (Zhang & Kang, 2017). За тот же период снеговая линия повышалась на 0,3 м в год на Западном Памире и понижалась на 5,1 м в год на Восточном Памире (Zhang and Kang, 2017). Это подчёркивает сильную

неоднородность условий по региону с запада на восток и согласуется с изменением изменчивости баланса массы и тенденций от первого (2000–2011 гг.) ко второму (2007–2018 гг.) периоду наблюдений на Памире, выявленными в работе Барандун и соавторами (Barandun et al., 2021).

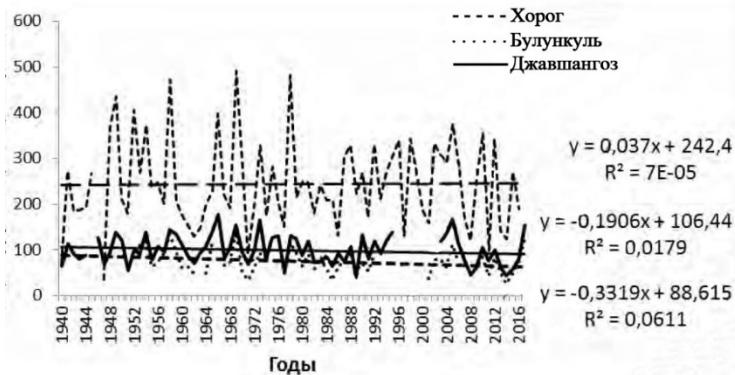


Рисунок 4.3.2. Общее количество осадков за холодный период (октябрь–апрель) в мм с 1940 по 2016 год (Ниязов и соавт., 2019)

Прошлые и текущие изменения в состоянии ледников

Горные ледники являются важным индикатором изменения климата, а их динамика, особенно изменения баланса массы поверхности, — важной климатической переменной. Ледники Таджикистана занимают площадь 8400 км², что составляет 6 % территории страны. Крупнейший ледник Таджикистана, ледник Федченко и его притоки — одна из крупнейших ледниковых систем за пределами полярных регионов (Lambrecht et al., 2014). Со времени первых научных исследований в 1928 году ледник Федченко сильно потерял в толщине (Lambrecht et al., 2018). Ламбрехт и соавторы (Lambrecht et al., 2018) обнаружили, что скорость истончения увеличилась в 1,8 раза в период с 2000 по 2016 год по сравнению с периодом с 1928 по 2000 год. Даже самые высокие аккумулятивные бассейны, расположенные выше 5000 м над уровнем моря, были затронуты истончением ледника, при этом скорость изменений составила от -0,2 до -0,4 м в год в период с 2009 по 2016 год. Расчётные показатели баланса массы в масштабах всего ледника составляют $-0,27 \pm 0,05$ м в. э. в год за период с 2000 по 2011 год и $-0,51 \pm 0,04$ м в. э. в год за период с 2011 по 2016 год (Lambrecht et al., 2018). Несмотря на увеличение потери массы, характер накопления в недавнем прошлом оставался неизменным (Lambrecht et al., 2020), что согласуется с выводами Кроненберга и соавторов (Kronenberg et al., 2021) и подтверждает предположение Кеаба и соавторов (Kääb et al., 2015) о том, что Памир и Каракорум находятся на западном краю аномалии прироста массы (Памиро-Каракорум-Гималайская аномалия), а не в её центре.

В регионе режимы ледников и их чувствительность к колебаниям климата крайне неоднородны (Aizen et al., 2011; Sakai and Fujita, 2017), что приводит к очень разным темпам отступления ледников на Памире (Dehecq et al., 2015, Barandun et al., 2021). Временная и пространственная неоднородность реакции ледников предполагает более сложную реакцию в результате воздействия климата на сток и большую важность изменчивости режима талых ледниковых вод для региона, чем считалось ранее (Barandun et al., 2021). Более того, выявление 186 активных пульсирующих ледников, в основном сосредоточенных в северной и западной частях Памира (Goelich et al., 2020), ещё больше усложняет достижение глубокого понимания характера современных взаимодействий между ледниками и климатом (Wendt et al., 2017). Кроме того, подвигаясь ледники могут запрудить реки, создавая угрозу прорыва и катастрофических наводнений (Долгушин и соавт., 1975; Котляков и соавт., 2008).

Барандун и соавторы (Barandun et al., 2021) обратили внимание на значительные различия в балансе массы ледников на Памире и выделили субрегионы со схожими балансами массы (рис. 4.3.3). Майлз и

соавторы (Miles et al., 2021) обнаружили, что 41 % ледников накапливают массу менее чем на 20 % своей площади, и только $60\% \pm 10\%$ годовой аблации в регионе компенсируется за счёт аккумуляции. Авторы предполагают, что без потепления в XXI веке $21\% \pm 1\%$ объёма льда будет потеряно к 2100 году из-за текущего дисбаланса климата/геометрии ледников в Высокогорной Азии, что означает 28 %-ное сокращение вклада талой воды от таяния ледников (Miles et al., 2021). Барандун и Поль (Barandun and Pohl, 2023) попытались объяснить эти неоднородные отклики с точки зрения климатических и морфотопографических факторов, но не пришли к убедительным результатам из-за низкого качества исходных данных. Авторы сделали вывод, что без сети гляциологических, метеорологических и гидрологических наблюдений *in situ*, предоставляемой сведениями, которые позволяют проводить прямую калибровку и валидацию обширных наборов данных, невозможно ни углубить наше понимание изменений климата и криосферы в региональном масштабе на Тянь-Шане и Памире, ни выполнить оценку обеспеченности водными ресурсами растущего населения региона.

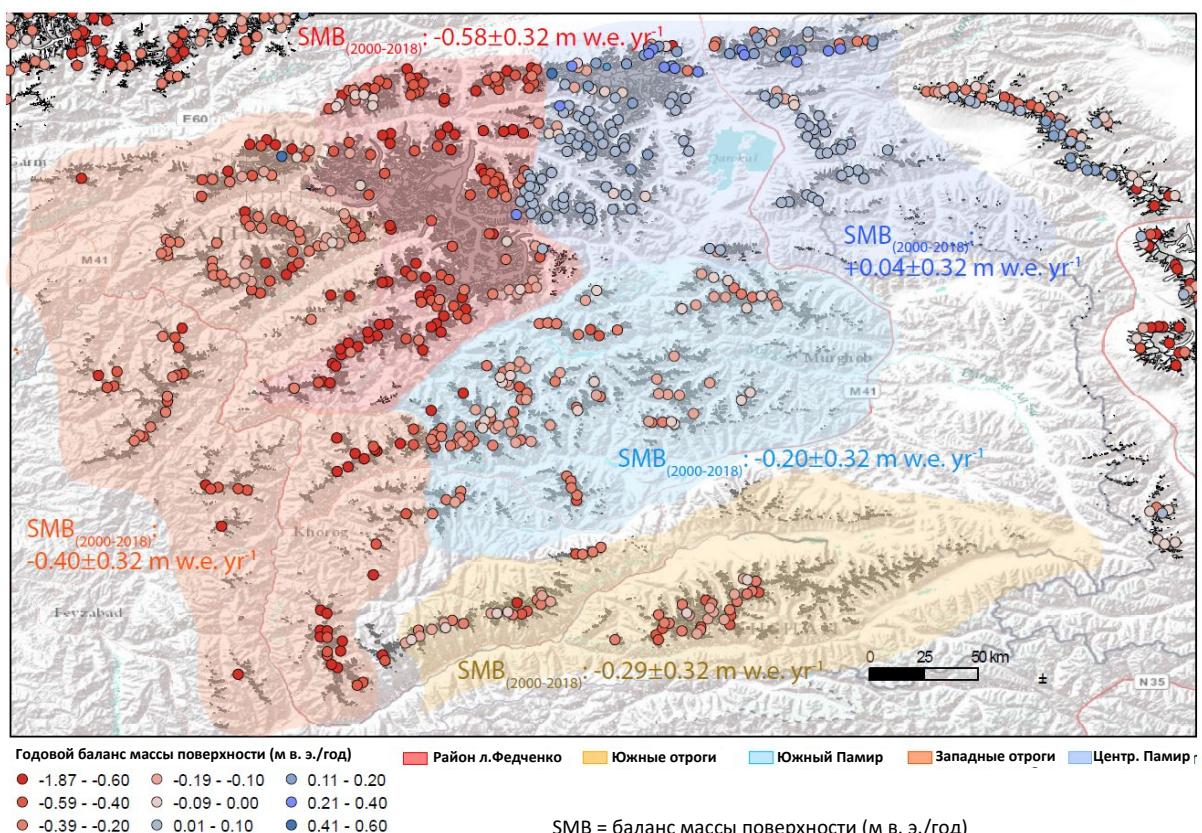


Рисунок 4.3.3. Годовой баланс массы поверхности для каждого ледника площадью более 2 km^2 на Памире. Деление на субрегионы с аналогичным балансом массы было предложено Барандун и соавторами (Barandun et al., 2021), чтобы подчеркнуть сильный контраст в режиме ледников, их реакции и чувствительности к колебаниям климата (Источник: Barandun et al., 2021).

Немногочисленные проводимые наблюдения, как правило, сосредоточены на изменениях площади ледников. Общая потеря площади наблюдается на различных водосборах, например, на ледниках Фортамбек, Сугран, Мушкетова в бассейне реки Муксу, а также на ледниках в верховьях Сауксая и Баляндкиика (рис. 4.3.4) (Махмадалиев и соавт., 2008). Большой ледник Саукдара отступил на 2 км в течение XX века. В бассейнах рек Ванч, Гунт, Бартанг и Шардара площадь ледников за последние 50 лет сократилась на 25–30 % (Махмадалиев и соавт., 2008). Отступление ледников в Гиссаро-Алае происходит неоднородно. Каюмов и соавторы (Каюмов и соавт., 2022) обнаружили отступление ледника на 9 % для водосбора Сарыгун за период 1977–2018 гг. В районе Сарезского озера полностью исчезли пять небольших ледников. Ледники в Мургабском районе растаяли почти на 30–40 %. Площадь ледника

7 км² в бассейне Вуждары (Гунт) уменьшилась в 1968 году на 0,2 км² (4,9%; Наврузшоев и соавт., 2021). Отступление ледников на Восточном Памире несколько менее выражено, чем на остальном Памире (Махмадалиев и соавт., 2008).

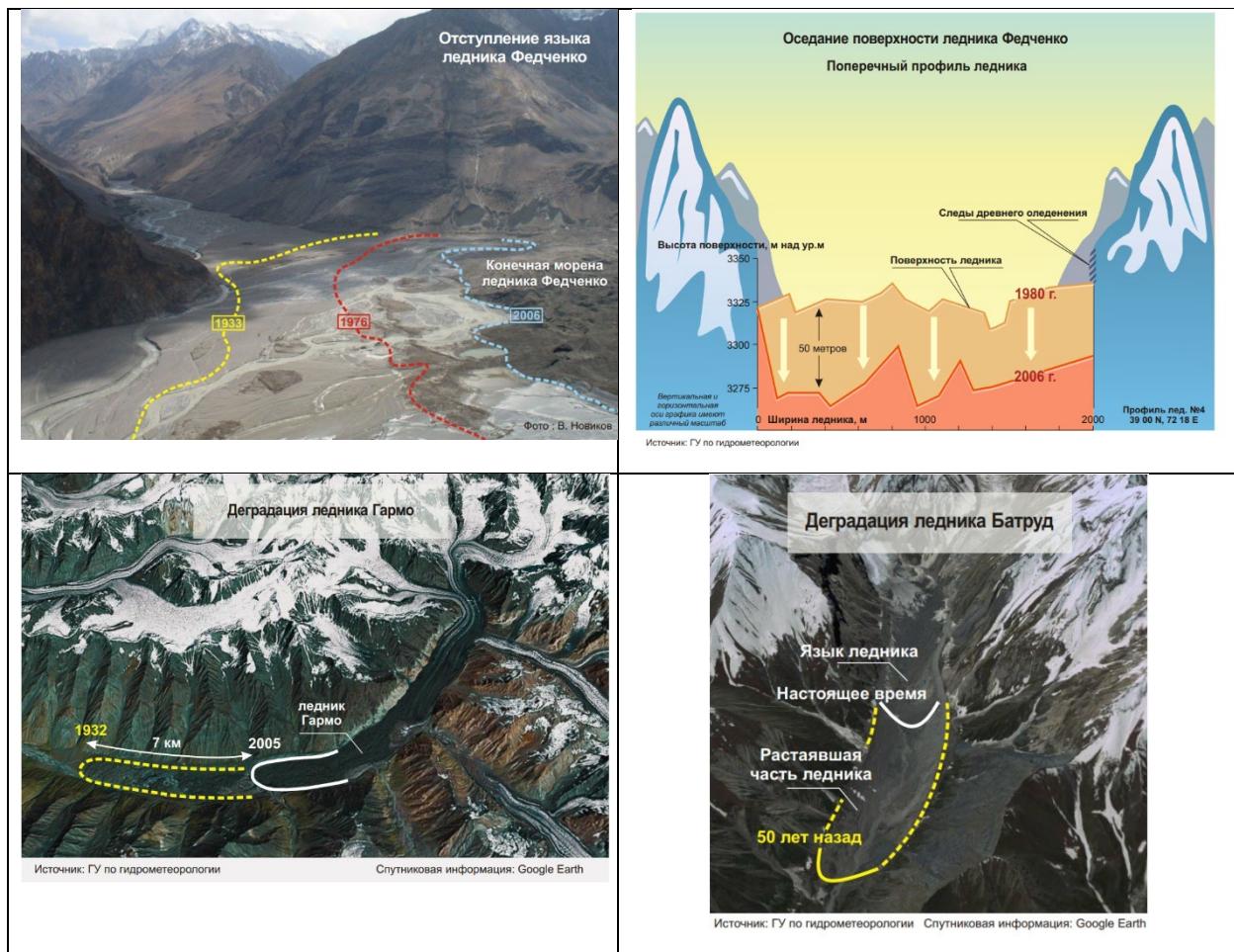


Рисунок 4.3.4. (Вверху слева) отступление ледника Федченко с 1933 по 2006 год, (вверху справа) оседание поверхности ледника Федченко с 1980 по 2006 год, (внизу слева) отступление ледника Гармо и (внизу справа) отступление ледника Батруд (Махмадалиев и соавт., 2008).

Измерения баланса массы ледников в Таджикистане были возобновлены только в последние годы. В настоящее время проводится мониторинг баланса массы на ледниках Якарча, ГГП, Ниссай (Сангвир), Зульмарт и леднике № 457. Измерения баланса массы на леднике Зульмарт (№ 139) были начаты в 2018 году. Вертикальный профиль баланса массы представлен на рис. 4.3.5. Результаты измерений баланса массы с 2018/19 по 2021/22 год показали, что баланс массы ледника Зулмарт (№ 139) отрицательный, в среднем -0,25 мм в. э. в год. Наибольший отрицательный годовой баланс массы (-0,31 мм в. э. в год) был отмечен в 2021/22 году.

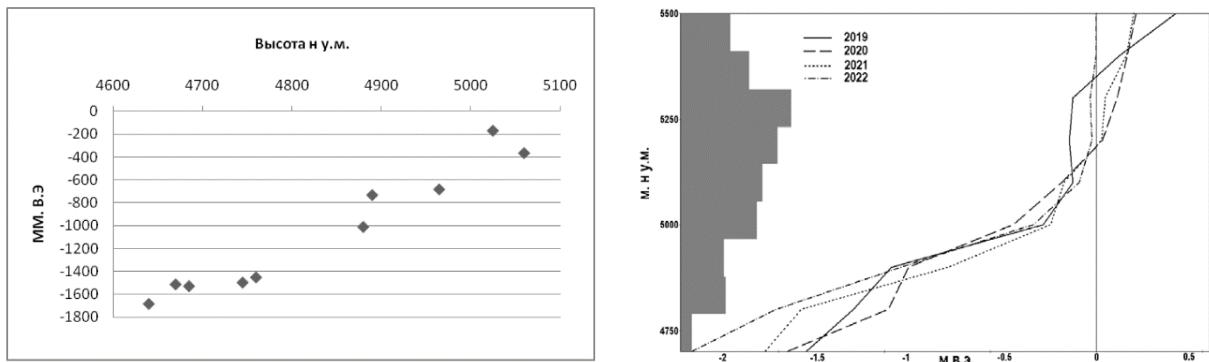


Рисунок 4.3.5. (Слева) показания аблационной рейки за 4 года измерений. (Справа) вертикальный градиент баланса массы и гипсометрия (серые столбики) ледника Зульмар (Каюмов и соавт., 2023).

С 2020 года проводятся измерения баланса массы ледника № 457 с использованием методов прямой гляциологии и моделирования. Ледник расположен в верховьях бассейна реки Токузбулак. Организация долгосрочного мониторинга в бассейне реки Гунт является важным шагом к улучшению мониторинга ледников на Восточном Памире и достижению лучшего понимания природы неоднородной реакции ледников на изменение климата в этом регионе. Ледник потерял $-0,3$ м в. э. в год своей массы за 2020/21 балансовый год, $-1,0$ м в. э. в год в 2021/22 и $-0,6$ м в. э. в год в 2022/23 году (рис. 4.3.6).

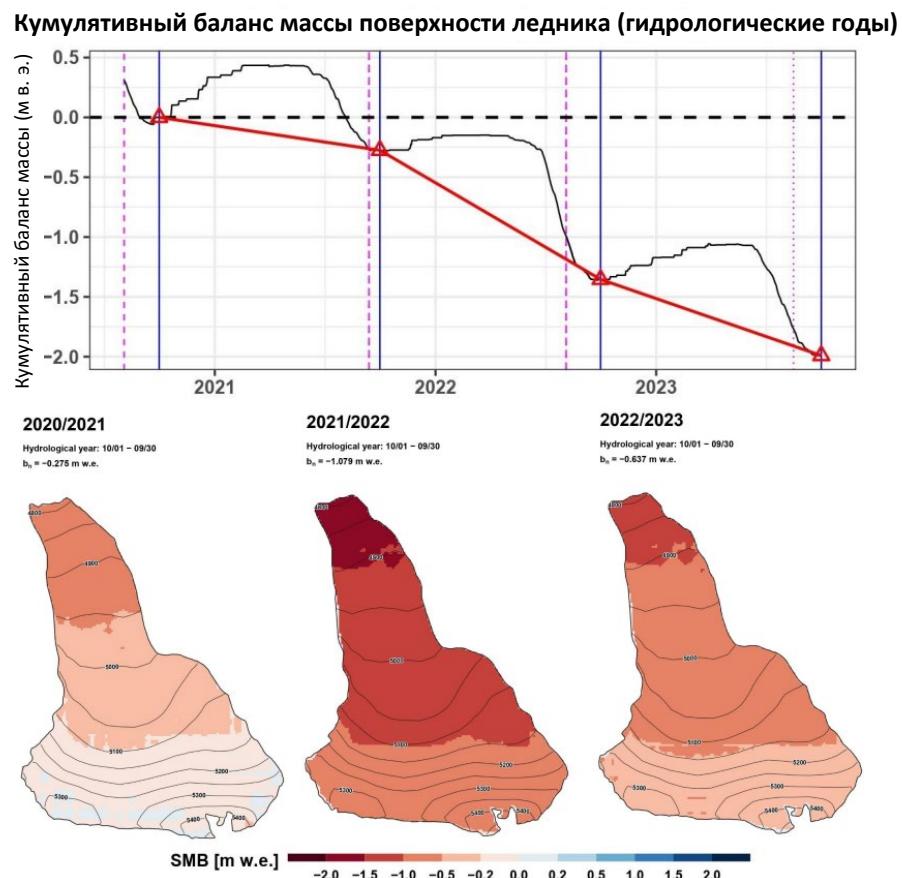


Рисунок 4.3.6. (Вверху) кумулятивный баланс массы поверхности ледника № 457 с 2001 по 2023 год, а также карты распределённого баланса массы для каждого гидрологического года с измерениями

Временные ряды баланса массы ледников в Таджикистане все ещё очень коротки, однако они необходимы для лучшего понимания природы неоднородной реакции ледников на изменение

климата в регионе. Таким образом, обеспечение устойчивости, расширение и поддержание сети мониторинга в Таджикистане должны быть наиболее приоритетными задачами.

Прошлые и текущие изменения в состоянии многолетней мерзлоты

В Таджикистане, особенно на Памире, многолетняя мерзлота имеет большое значение благодаря своему обширному присутствию. В пределах горных хребтов многолетняя мерзлота служит важнейшей системой хранения воды, особенно значимой в засушливых регионах. Кроме того, она оказывает решающее влияние на устойчивость склонов и риски связанных с ними опасных природных явлений. Несмотря на это, исследования распространения многолетней мерзлоты, теплового режима (включая мониторинг температуры в скважинах) и содержания грунтового льда в регионе с 1980-х годов носили ограниченный характер (Barandun et al., 2020).

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; 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.

За последние шестьдесят лет многолетняя мерзлота деградировала, и объём подземных льдов, вероятно, существенно уменьшился. Эта тенденция наблюдается во всём мире и, скорее всего, сохраняется и в горных регионах Центральной Азии (Biskaborn et al., 2019). Такие темпы оттаивания горной мерзлоты могут спровоцировать широкомасштабную нестабильность ландшафта, вызывая камнепады, сели, оползни и изменяя экологическую ситуацию в горных районах (Allen et al., 2022). Развитию опасных и зачастую катастрофических криогенных геологических процессов способствует повышенная сейсмо-динамическая активность районов развития высокогорной мерзлоты в Таджикистане. Эти факторы необходимо учитывать как при составлении проектов хозяйственного освоения этих районов, так и при проведении мероприятий по защите уже построенных в горах объектов (Фролов и соавт., 2022).

Кроме того, многолетняя мерзлота может влиять на опасность наводнений, связанных с прорывом ледниковых озёр, поскольку многие горные озёра в Таджикистане запружены геоморфологическими образованиями мерзлотного происхождения, такими как ледяные морены или каменные глетчеры (Allen et al., 2022; Zheng et al., 2021). Каменные глетчеры, распространённая форма многолетней мерзлоты, особенно многочисленны в регионе: Ма и Огучи (Ma and Oguchi, 2023) зафиксировали более 600 каменных глетчеров только в Рушанском хребте. Озёра, запруженные каменными глетчерами (или любыми другими формами мёрзлых отложений), могут быть подвержены внезапному сбросу водной массы в случае деградации и последующей потери устойчивости запруд. В этом контексте каменные глетчеры важны не только как хранилище потенциально значительных объёмов воды (Jones et al., 2018), но и из-за связанных с ними потенциальных опасностей (Mergili et al., 2012).

Заключение

Криосфера Таджикистана неоднородно реагирует на изменение климата. Эта неоднородность уникальна. Наблюдаемые изменения в состоянии снежного покрова, ледников и многолетней мерзлоты в Таджикистане не только влияют на водообеспеченность значительной части Центральной Азии, но и являются источником опасных природных явлений. Несмотря на региональную значимость этих процессов, прямые наблюдения в регионе крайне скучны, а многие станции мониторинга были

созданы лишь недавно. Отсутствие наблюдений *in situ* препятствует достижению глубокого понимания различных природных реакций и движущих сил на Памире. Большая неопределенность в региональных метеорологических данных остаётся основным препятствием для понимания нами процессов, вызывающих изменения в связке «климат–ледник–сток». Необходимо продолжать мониторинг в сочетании с моделированием баланса масс и стока, чтобы понять влияние климатических изменений на криосферу и, соответственно, разработать политические меры в ответ на быстро растущий спрос на воду в Центральной Азии (Barandun et al., 2021). Таджикистан переживает значительные изменения в своей криосфере. Программы международного сотрудничества и проекты, такие как CROMO-ADAPT и PAMIR, демонстрируют стремление к расширению возможностей мониторинга и изучению влияния изменения климата на криосферу. Однако большинство мероприятий по мониторингу находятся только на начальном этапе. Необходимы значительные усилия, чтобы гарантировать долгосрочность мониторинга, управляемого и осуществляемого национальными специалистами в сотрудничестве с научным сообществом региона.

4.4. Изменения в криосфере Узбекистана

Гуломджон Умирзаков^a, Лидия Карандаева^b, Бибинур Гульмурзаева^b, Томас Сакс^c, Серикжан Атанов^c,
Мартина Барандун^c

^a Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

^b Научно-исследовательский гидрометеорологический институт центра гидрометеорологической службы Республики Узбекистан (Узгидромет), Ташкент, 100052, Узбекистан

^c Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

Введение

Страны Центральной Азии сталкиваются с двумя основными проблемами: нехваткой воды и потенциальным воздействием глобального потепления. Растущий дефицит воды в Узбекистане считается актуальной проблемой, влияющей на благополучие населения и устойчивое развитие экономики (Lioubimtseva & Henebry, 2009). Таяние снега обеспечивает более 50 % годового стока, а ледники являются вторым по значимости поставщиком воды (Schulz, 1965; Sorg et al., 2012). Вклад талой воды ледников становится особенно важным в летний период, когда потребность в воде достигает своего пика (например, Pohl et al., 2017; Pritchard, 2019; Barandun et al., 2020). Ледники обеспечивают талую воду в жаркие летние месяцы, компенсируя истощение сезонных запасов снега, и особенно важны в маловодные годы, когда речной сток недостаточен (Глазырин, 1985).

Со второй половины XX века в Центральной Азии наблюдается значительное изменение состояния криосферы (Кудышкин и соавт., 2014; Barandun et al., 2021; Aizen et al., 2007). Деградация криосферы имеет серьёзные последствия для обеспеченности водными ресурсами, особенно в контексте происходящего глобального изменения климата. Исследователи встревожены продолжающейся деградацией криосферы и подчёркивают необходимость реализации устойчивых мер по адаптации и смягчению последствий, направленных на решение нынешних и будущих проблем водопотребления. Исследования показывают, что даже небольшое изменение, например, повышение температуры воздуха на 1 °C или уменьшение количества атмосферных осадков на 20 %, может привести к значительному сокращению площади ледников (Глазырин, 2009). С учётом высокого агрометеорологического потенциала Узбекистана это подчёркивает уязвимость ледниково-зависимых регионов даже к незначительным изменениям температуры и количества осадков. Такая уязвимость сказывается на эффективности управления водными ресурсами и требует принятия стратегий адаптации в условиях глобального изменения климата. Трансграничный характер речных систем Центральной Азии подчёркивает необходимость

международного сотрудничества в решении проблем, связанных с водными ресурсами. Изменения в динамике ледников в одной стране могут иметь каскадные последствия для стран, расположенных ниже по течению. Для Узбекистана водные ресурсы криосферы имеют решающее значение. Однако зоны питания таких крупных рек, как Амударья, Зеравшан и Сырдарья, находятся за пределами страны (Schulz, 1965).

Прошлые и текущие изменения в состоянии снежного покрова

Снежный покров является основным источником питания в годовом стоке рек бассейна Аральского моря (Aizen et al., 1995; Armstrong et al., 2019). Однако оценка запасов снега затруднена из-за неравномерного его распределения в пределах горной территории. Рельеф местности существенно влияет на формирование снежного покрова в речных бассейнах, причём решающую роль играет высота рельефа над уровнем моря. Таким образом, расчётные объёмы снегозапасов распределяются по горной территории неравномерно. Влияние рельефа на формирование снежного покрова в речных бассейнах может существенно различаться в небольших масштабах. Изменение количества осадков с высотой над уровнем моря, в свою очередь, зависит от ориентации горных склонов, степени экранированности района от влагонесущих масс воздуха и других факторов (Dozier et al. 2016). В пределах горных речных бассейнов наблюдается заметный градиент количества осадков с изменением высоты. Такая выраженная неоднородность затрудняет мониторинг и оценку снегозапасов, внося значительную долю неопределённости в расчёты и прогнозы, особенно на недостаточно контролируемых больших высотах.

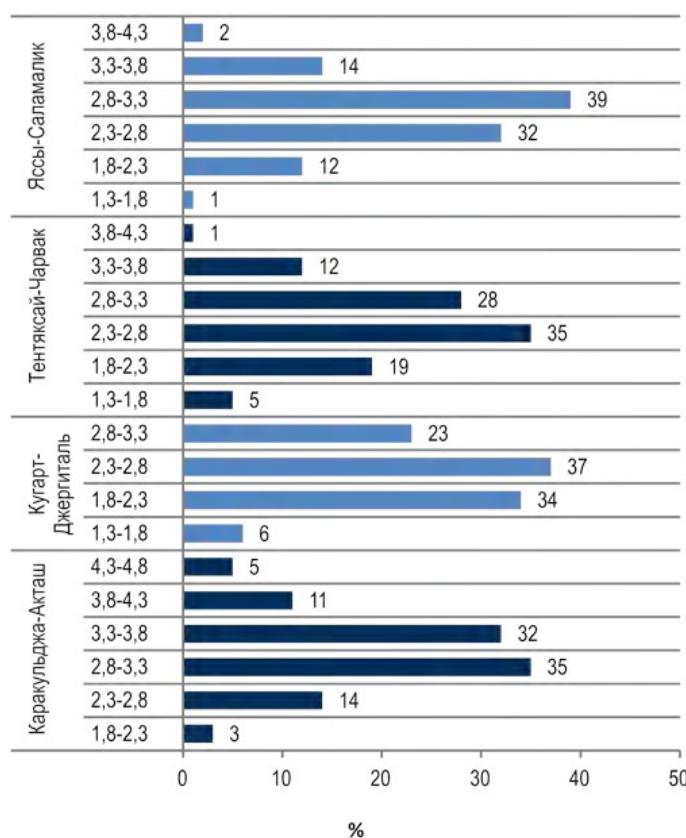


Рисунок 4.4.1. Распределение средних многолетних объёмов снегозапасов в % по высотным зонам (оси у) на конец марта для бассейнов горных рек Узбекистана (Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по РКИК ООН, 2016)

Становление снегового мониторинга в Узбекистане тесно связано с развитием гидрологических исследований в Центральной Азии. Впервые осознав, что снег играет важную роль в речном стоке, Шульц (Шульц, 1965) классифицировал реки Центральной Азии по типу питания. Это послужило толчком

к созданию и расширению сети мониторинга снежного покрова в 1940-х годах: мониторинг толщины и плотности снега на полигонах гидрометеорологических станций в горной местности; мониторинг толщины снега по профилям в отдельных речных бассейнах; а начиная с 1960-х годов, после того как гидрометеорологические службы получили в своё распоряжение вертолёты, была создана сеть снегомерных реек. Мониторинг толщины снежного покрова проводился 2–3 раза в год. В 1970-80-х годах большое внимание учёных было уделено количественной оценке запасов снега, которая в конце 1980-х годов стала дополняться данными оптических спутников. После распада Советского Союза сеть мониторинга снежного покрова значительно сократилась. Начиная с XXI века количественная оценка снежных ресурсов всё больше опирается на системы дистанционного зондирования, но оценка водного эквивалента снега остаётся сложной задачей (Gafurov et al., 2013), в основном из-за недостаточного количества полевых наблюдений.

При оценке снегонакопления использовалась эмпирическая модель, разработанная в Научно-исследовательском гидрометеорологическом институте Узгидромета, охватывающая несколько горных водосборов, и позволяющая оценивать запасы снега по высотным зонам. Эта модель основана на обширных данных наблюдений за снежным покровом, проводившихся с 1960-х до конца 1990-х годов. В результате были получены оценки объёмов снегозапасов для различных речных бассейнов и кривые распределения средних многолетних величин снегозапасов по высотным зонам (рис. 4.4.1). Для оценки снежного покрова в верхних водосборах Амударьи и Сырдарьи в Узгидромете на основе ГИС-технологий разработана система, позволяющая в результате обработки спутникового изображения получить информацию о доле заснеженности каждого рассматриваемого речного бассейна в систематическом виде (рис. 4.4.2).

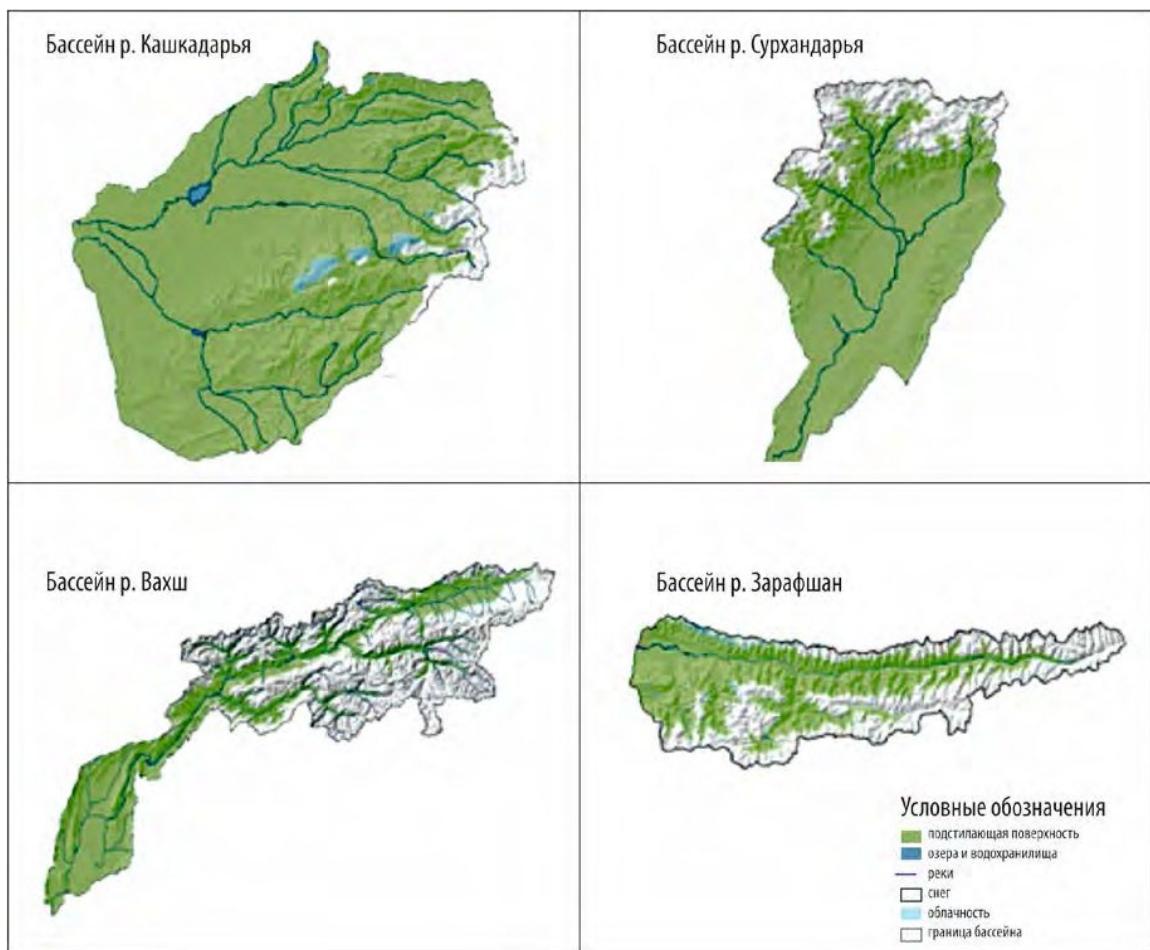


Рисунок 4.4.2. Карты заснеженности бассейнов рек на основе данных NOAA (28.04.2015) (Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по РКИК ООН, 2016)

Многочисленные исследования, основанные на данных дистанционного зондирования, свидетельствуют о сокращении площади снежного покрова в последние десятилетия. Янг (Young, 2023) использовал два различных статистических теста для анализа данных MOD10C2 за период с 2000 по 2022/2023 год с целью выявления различных сезонных тенденций изменения площади снежного покрова. Оба метода дали схожие результаты. Эти результаты также подтверждаются более ранними исследованиями Чжоу и соавторов (Zhou et al., 2017) с использованием комбинированного набора данных о протяжённости снежного покрова радиометров AVHRR и MODIS за период с 1986 по 2008 год и Манкина и Диффенбаха (Mankin and Diffenbaugh, 2015), показавшими уменьшение продолжительности и максимальной высоты снежного покрова в западной части Тянь-Шаня.

Анализ изменений годовых сумм осадков, осреднённых по различным районам Узбекистана, за период 1950–2013 гг. показывает очень слабые тенденции к уменьшению (Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по РКИК ООН, 2016). Тенденции к уменьшению осадков в горной зоне прослеживаются во всех сезонах, за исключением зимних месяцев, в отрогах Западного Тянь-Шаня. Аналогичные историческим тенденции изменений количества осадков ожидаются на будущее в соответствии с климатическими сценариями, что указывает на общее сокращение уровня водообеспеченности в Узбекистане (рис. 4.4.3) (Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по РКИК ООН, 2016). Существенное уменьшение площади снежного покрова возможно в бассейнах рек, расположенных в отрогах Западного Тянь-Шаня (р. Угам, р. Ахангаран), включая реки севера Ферганской долины (р. Гавасай) и отрогах Гиссаро-Алая (р. Кашкадарья и р. Сурхандарья). Чем ниже средняя высота водосбора бассейна реки, тем интенсивнее происходит сокращение площади снежного покрова (Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по РКИК ООН, 2016).

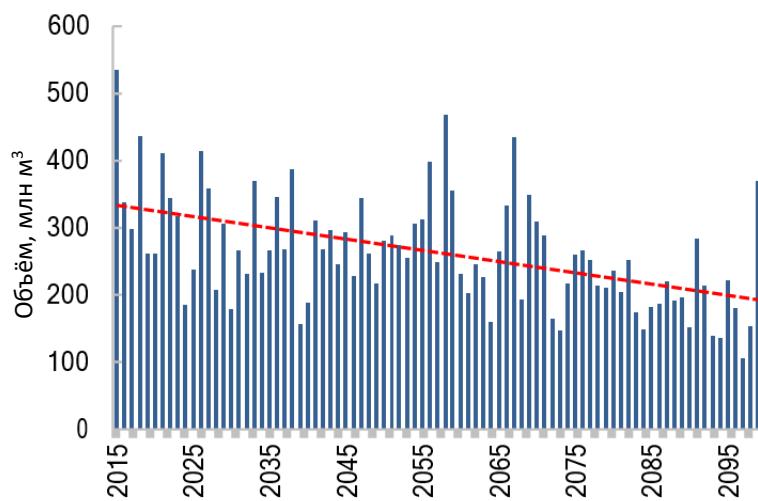


Рисунок 4.4.3. Оценки снегозапасов в долгосрочной перспективе для бассейна р. Кашкадарья, на конец марта (Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по РКИК ООН, 2016)

Прошлые и текущие изменения в состоянии ледников

Ледники в Узбекистане находятся в верховьях бассейнов рек Кашкадарья (полностью), Пскема (включая притоки р. Пскем и бассейн р. Ойгаинг) и Сурхандарья (включая бассейны рек Сангардак и Тупаланг) (Кудышкин и соавт., 2014). Ледники в этих бассейнах характеризуются относительно небольшими размерами. По состоянию на 2010 г., в бассейнах этих рек находится 613 ледников суммарной площадью 158,19 км² (табл. 4.4.1). Из них 411 ледников общей площадью 99,69 км² расположены в пределах границ Узбекистана (Кудышкин и соавт., 2014).

Таблица 4.4.1. Общая площадь и количество ледников в речных бассейнах по результатам инвентаризации в различные годы (Кудышкин и соавт., 2014)

Речной бассейн	Суммарная площадь ледников, км ²			Число ледников		
	1957	1978	2010	1957	1978	2010
р. Пскем	119,80	106,13	102,52	211,00	260,00	262,00
р. Кашкадарья	18,14	15,51	7,85	68,00	65,00	61,00
р. Сурхандарья	70,37	59,20	47,82	289,00	285,00	290,00

Исследования ледников в Узбекистане начались в начале 1960-х годов. Государственная гидрометеорологическая служба Узбекистана провела три комплексных инвентаризации ледников (Щетинников и Подкопаева, без даты), в результате которых, например, в бассейне реки Пскем было впервые зафиксировано 140 ледников на площади 128,8 км² (табл. 4.4.1) (Канаев, 1966).

Нарама и соавторы (Narama et al., 2010) подчёркивают, что наиболее сильное сокращение ледников произошло во внешних хребтах Тянь-Шаня, включая три вышеупомянутых бассейна. По данным Кудышкина и соавт. (Кудышкин и соавт., 2014), площадь оледенения уменьшилась на 17,28 км² в бассейне реки Пскем, на 10,29 км² в бассейне реки Кашкадарья и на 22,55 км² в бассейне реки Сурхандарья, что составляет потерю площади на 14,4 %, 56,7 % и 32,0 % с 1957 по 2010 год, соответственно (табл. 4.4.1). В то же время Семакова и соавторы (Semakova et al., 2016) сообщают о сокращении площади оледенения с 1960-х по 2010-е годы на 23 % в бассейне реки Пскем (включая Майдантал), на 49 % в Кашкадарьинском и на 40 % в Сурхандарьинском (включая Сангардак и Тупаланг) бассейнах (рис. 4.4.4). Темпы сокращения оледенения существенно различаются для речных бассейнов, расположенных в разных климатических и орографических условиях, и с разной степенью оледенения. При этом приводимые в литературе данные о площади ледников также существенно различаются в зависимости не только от степени изменения площади, но и от размера включённых ледников, источника данных и методов картирования (например, Карандаева, 2004; Токмагамбетов, 2010; Глазырин и Таджибаева, 2011; Финаев, 2013).

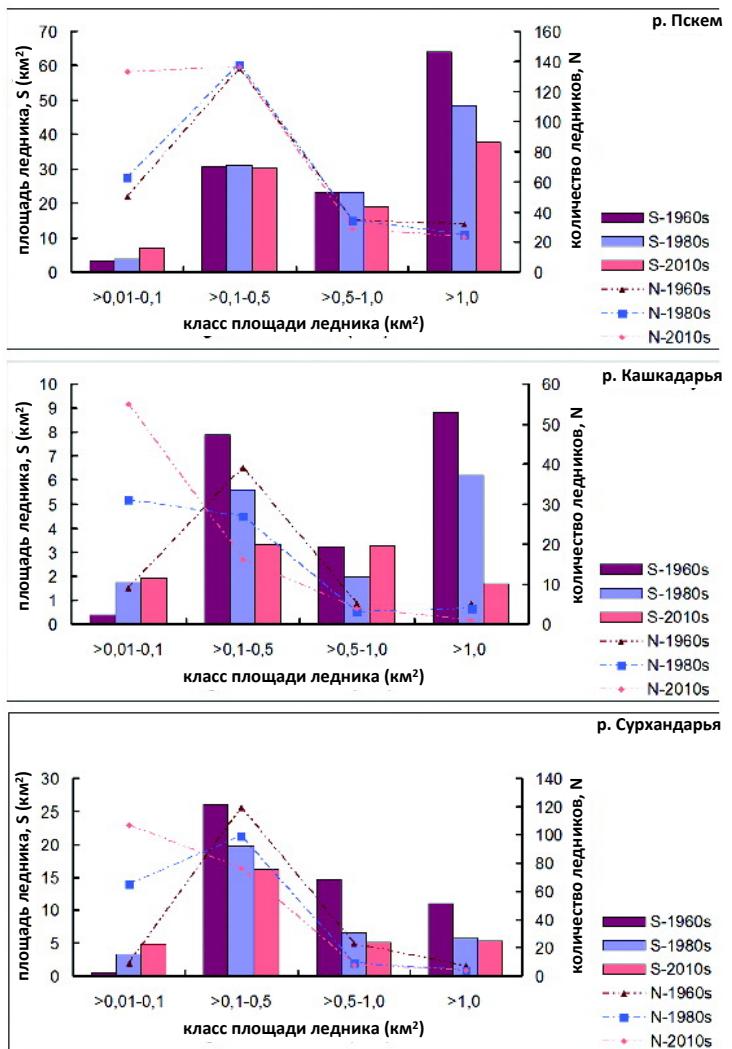


Рисунок 4.4.4. Количество и площадь ледников в размерных классах для разных периодов по данным Семаковой и соавторов (Semakova et al., 2016)

В Узбекистане преобладают малые ледники. Крупные ледники распались на малые, что объясняет увеличение количества и площади малых ледников в последние годы и уменьшение количества и площади больших ледников.

Оценки изменения объема оледенения редки для региона. По данным последней инвентаризации 2010 года, охватывающей период с 1957 по 2010 год, объем ледников сократился на $0,844 \text{ км}^3$ (или на 24,3 %) в бассейне реки Пскем; на $0,261 \text{ км}^3$ (или на 67,4 %) в бассейне реки Кашкадарья; и на $0,538 \text{ км}^3$ (или на 40,1%) в бассейне реки Сурхандарья (источник данных: Научно-исследовательский гидрометеорологический институт при Гидрометеорологической службе Узбекистана). Семакова и Семаков (Semakova & Semakov, 2022) оценили среднюю скорость опускания поверхности в $-0,68 \pm 3,91 \text{ м}$ в год с 2012 по 2014 год, а Семакова и Бюлер (Semakova & Bühler, 2017) рассчитали геодезический баланс массы в зоне абляции ледников в долине Пскема в $-0,82 \pm 0,36 \text{ м в. э.}$ в год с 2000 по 2012 год. Однако в обоих исследованиях неясно, как учитывалась зона аккумуляции. Для сравнения, результаты прямого гляциологического мониторинга на леднике Баркрак свидетельствуют о несколько менее выраженном отрицательном балансе массы за последние 6 лет с тенденцией ускорения потери массы за последние 3 года (рис. 4.4.5). Наиболее значительная потеря массы произошла в последние годы, особенно на леднике Баркрак Средний, где потеря массы удвоилась (рис. 4.4.6). Площадь ледника за эти годы уменьшилась с $2,39 \text{ км}^2$ до $1,84 \text{ км}^2$ для Баркрака Среднего и с $0,56 \text{ км}^2$ до $0,42 \text{ км}^2$ для Восточной ветви Баркрака Среднего.

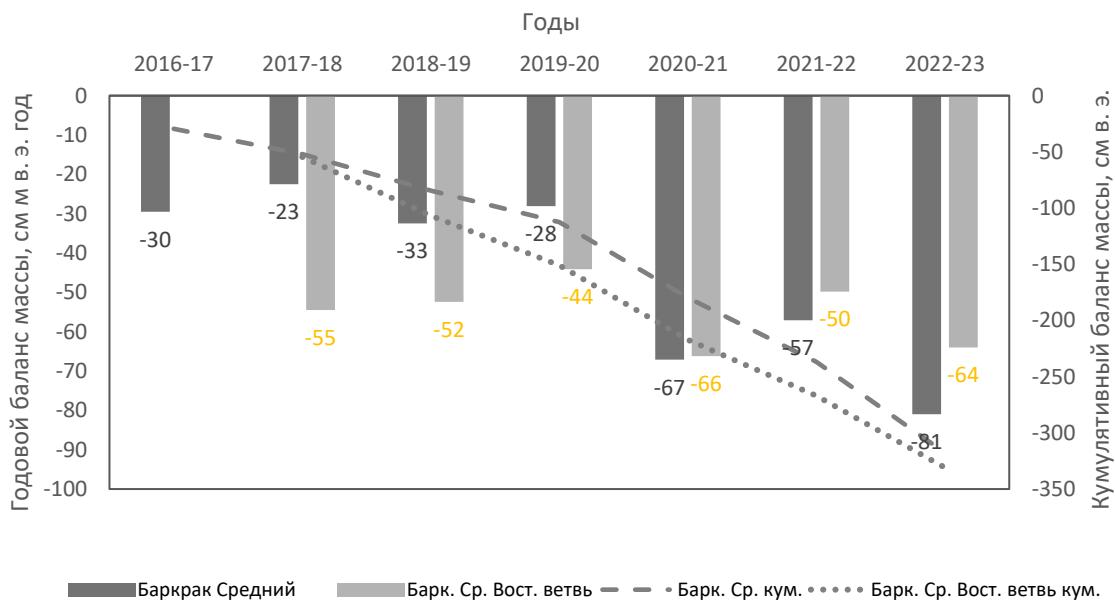
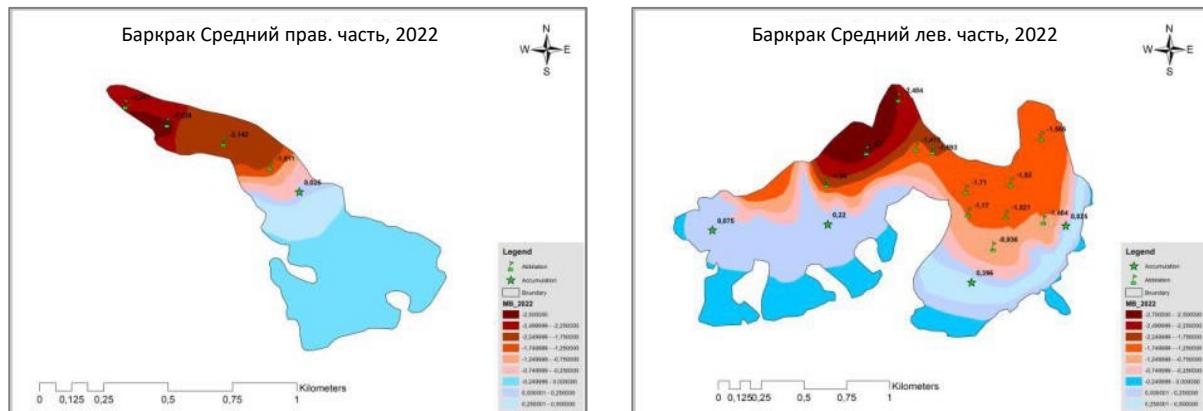


Рисунок 4.4.5 Годовой и кумулятивный баланс массы ледников Баркрак Средний и Восточная ветвь Баркрака Среднего (Авторы: проект CICADA, Фрибурский университет и ALM-202107010)

В настоящее время Баркрак Средний является единственным ледником Узбекистана, за которым ведётся постоянный мониторинг. В 1960-х годах Институт математики Академии наук Узбекистана и Узгидромет начали изучение режима пскемских ледников и провели летом 1961 и 1962 годов энергобалансовые наблюдения на двух ледниках Баркракской группы (бассейн реки Ойгаинг) — Баркрак Средний и Баркрак Правый. В последующие годы исследования динамики и изменений площади ледников активизировались и включали, например, измерения скоростей движения ледников, метеорологические наблюдения и наблюдения за балансом массы (Виноградов и соавт., 1966; Щетинников и Подкопаева, 1968; Щетинников, 1976). В Узбекистане благодаря проектам CATCOS и CICADA в 2017 году были возобновлены систематические наблюдения за ледниками¹⁵. На леднике Баркрак Средний площадью 2,04 км² баланс массы регулярно измеряется *in situ* с 2017 года (Hoelzle et al., 2017), и данные регулярно представляются во Всемирную службу мониторинга ледников. Проект предусматривал установку на леднике автоматической метеостанции и камеры для наблюдения за изменениями высоты снежного покрова. Цель инициативы — расширить возможности наблюдения за климатом и обеспечить ценные данные для глобальных исследований в области мониторинга криосферы.



¹⁵ Проекты CATCOS и CICADA [только на англ.]: <https://www.unifr.ch/geo/cryosphere/en/projects/glacier-monitoring-and-dynamics/cicada.html>

Рисунок 4.4.6. Карты распределения баланса поверхности массы для Баркрак Средний для гидрологических лет 2021–2022 гг. (Проект CICADA, Фрибурский университет и проект АЛМ-202107010¹⁶)

Прошлые и текущие изменения в состоянии многолетней мерзлоты

Региональный характер распределения многолетней мерзлоты в первую очередь зависит от высоты над уровнем моря, наклона, экспозиции склонов, характеристик поверхности и подповерхностного слоя, которые оказывают большое влияние на баланс энергии на поверхности и её передачу в грунт. Растительность, обломочный и снежный покров, фактура земной поверхности и содержание льда, зимняя инверсия температуры воздуха, наличие и движение поверхностных и грунтовых вод также являются одними из наиболее важных параметров, определяющих распределение горной многолетней мерзлоты. В целом, на севере Тянь-Шаня многолетняя мерзлота существует на высотах выше 3600 м над уровнем моря. Зона прерывистой мерзлоты простирается от 3200 до 3600 м над уровнем моря, а зона островной мерзлоты присутствует на высотах от 2700 до 3200 м над уровнем моря (Марченко и соавт., 2007).

На сегодняшний день многолетняя мерзлота в Узбекистане интенсивно не изучалась научным сообществом, поэтому о её распространении и встречаемости можно судить только по региональным оценкам многолетней мерзлоты. По данным Грубера (Gruber, 2012), распространение многолетней мерзлоты в Узбекистане ограничено верхними частями Угамского, Пскемского и Чаткальского хребтов.

Прогнозируемые изменения климата в будущем

Глазырин (Глазырин, 2009) рассчитал возможные реакции оледенения на различные изменения годовых сумм осадков и летних температур воздуха. По климатическому сценарию с повышением температуры на 3 °C в бассейне реки Ойгаинг (станция Устье), который является бассейном с наибольшим оледенением в Узбекистане, произойдёт полная дегляциация (Глазырин, 2009). Результаты других исследований, основанных на сценариях будущих выбросов (WRE450, WRE750, A1FI), указывают на увеличение усадки ледников в течение следующих 30–50 лет, что приведёт к полному исчезновению ледников, расположенных в бассейнах рек Кашкадарья и Сурхандарья. Модельные исследования также показали, что после первоначального увеличения темпов таяния ледников, вклад талых вод, вероятно, также будет сильно уменьшаться, особенно в сухой летний сезон.

Ледники служат естественными резервуарами пресной воды. В летние месяцы вклад талых ледниковых вод в сток рек Амудары и Сырдары составляет значительную часть (35–55 %) общего стока этих рек (Armstrong et al., 2019). Этот вывод подчёркивает критическую зависимость от талой ледниковой воды, особенно в летние месяцы с высоким спросом на воду. Сокращение размеров ледников в сочетании с уменьшением продолжительности и высоты снежного покрова создаёт прямую угрозу доступности водных ресурсов, особенно в засушливые годы.

В будущем ситуация будет усугубляться в связи с продолжающимся отступлением ледников. Наиболее значительные изменения наблюдаются на западной окраине Тянь-Шаня (Barandun et al., 2021; Narama et al., 2010). Ледники в Узбекистане расположены на относительно низкой высоте и подвержены сильному воздействию повышения температуры воздуха, которое не может быть компенсировано зимним выпадением снега, что приводит к фрагментации крупных ледников и исчезновению более мелких (Semakova et al., 2016). Предполагается, что в ближайшие годы эта тенденция в регионе усиливается. Малые ледники составляют 80 % от общего числа ледников в Узбекистане (рис. 4.4.4). Это подчёркивает уязвимость региона к преобладающим климатическим сдвигам (Третье национальное

¹⁶ Проект АЛМ-202107010 — «Разработка системы мониторинга изменений баланса массы горных ледников и технологий, характеризующих их будущее состояние в условиях глобального изменения климата». Учредитель — Агентство инновационного развития Республики Узбекистан.

сообщение Республики Узбекистан по РКИК ООН, 2016). Понимание характера распределения и динамики криосферы на региональном уровне необходимо для эффективного планирования водных ресурсов.

Заключение

Криосфера различных речных бассейнов Узбекистана, таких как Пскем, Чаткал, Кашкадарья и Сурхандарья, за прошедшие годы претерпела значительную деградацию. Сокращение площади оледенения составляет от 24 % до 56,7 %, что свидетельствует о значительном уменьшении площади ледников. Баланс массы ледников, таких как ледник Баркрак Средний, показывает устойчивую отрицательную тенденцию на протяжении многих лет. Изменения снежного покрова, необходимого для питания рек в бассейне Аральского моря, тесно связаны с колебаниями атмосферных осадков, температуры воздуха и высоты над уровнем моря. Неравномерное распределение скоплений снега и изменения площади снежного покрова вносят неопределенность в результаты пока ещё скучной деятельности по мониторингу и прогнозированию. Многолетняя мерзлота в регионе остаётся малоизученной, и о её наличии, масштабах и динамике известно не так много.

Деградацию криосферы в Узбекистане связывают с изменением климата, в частности с повышением среднегодовой температуры воздуха. Прогнозные оценки показывают, что в зависимости от различных сценариев выбросов парниковых газов тенденция сокращения ледников, скорее всего, сохранится, что будет иметь последствия для водных ресурсов. Изменения снежного покрова и ледников оказывают прямое влияние на гидрологический режим, отражаясь на речном стоке в разные сезоны. Узбекистан предпринимает систематические усилия, включая использование технологий дистанционного зондирования, для мониторинга и оценки состояния ледников и снежного покрова. Международное сотрудничество и проекты, такие как CATCOS и CICADA, демонстрируют стремление к укреплению потенциала мониторинга и улучшению понимания воздействия изменения климата на криосферу.

В заключение следует отметить, что в состоянии криосферы Узбекистана происходят значительные изменения: ледники отступают, снежный покров уменьшается, а многолетняя мерзлота нагревается. Это сказывается на водохозяйственной деятельности и управлении гидрологическими системами. Постоянный мониторинг, научно-исследовательская работа и сотрудничество с международными организациями имеют решающее значение для лучшего понимания ожидаемых изменений и адаптации к ним.

4.5. Перспективы мониторинга криосферы

Энрико Маттеа^a, Мартина Барандин^a

^a Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

Ожидается, что в течение оставшейся части XXI века ледники в горных хребтах Центральной Азии сохранят текущую, ускоряющуюся тенденцию потери массы (Hugonnet et al., 2021; Marzeion et al., 2012; Radić et al., 2014). По оценкам Хусса и Хока (Huss and Hock, 2015), 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. Относительные потери массы будут весьма неоднородными: самые маленькие и низко расположенные ледники, согласно прогнозам, фактически исчезнут задолго до 2100 года, даже при сценариях с низким уровнем выбросов; напротив, более мощные и высоко расположенные ледники сохранятся до XXII века даже при более пессимистичных прогнозах, хотя и с потерями объёма более 50 %.

Текущее и будущее потепление атмосферы также влияет на тепловой режим полигармонических ледников, содержащих лёд при температурах ниже точки замерзания и характерных для горных хребтов Центральной Азии (Barandun et al., 2020). Хотя наличие холодной толщи таких ледников снижает скорость потери массы, их переход к более умеренным температурам может привести к увеличению числа потенциально опасных событий дестабилизации и обрушения ледников (Gilbert et al., 2015).

Быстрое изменение состояния ледников влияет на гидрологический режим горных водосборов: в соответствии с результатами моделирования Хусса и Хока (Huss and Hock, 2018), ожидается, что годовой сток достигнет максимума (из-за усиления таяния), 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). 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) — более чем на 25 % от общего стока бассейна (Huss and Hock, 2018).

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 (Compagno et al., 2022) и улучшение понимания будущего нестабильных ледников нагонного типа в условиях меняющегося климата (Käab 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 неопределенности — путём сочетания наблюдений *in situ* с методами дистанционного зондирования и применения численных моделей (Barandun et al., 2020).

ГЛАВА 5. МОНИТОРИНГ И ДАННЫЕ О КРИОСФЕРЕ

Тамара Матис^a, Джоэл Фиддес^b, Эрик Поль^a, Томас Сакс^a, Мартина Барандун^a

^a Фрибурский университет, Фрибур, Швейцария

^b Швейцарский федеральный институт исследования снега и лавин, Давос, Швейцария

На 21-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) Генеральная Ассамблея ООН согласовала 17 Целей устойчивого развития (ЦУР) и связанных с ними задач, которые обеспечивают всеобъемлющую основу для реализации Парижского соглашения. Однако для достижения ЦУР и цели по ограничению глобального потепления уровнем 2 °C (или 1,5 °C) в сроки, позволяющие избежать серьёзных потрясений для человечества, необходимы значительные усилия. Поэтому мониторинг и стратегии по обеспечению устойчивости к изменению климата, смягчению его последствий и адаптации должны основываться на надёжных данных базисных наблюдений за климатом (Bojinski et al., 2014), и, в частности, на основных климатических переменных, определённых Глобальной системой наблюдений за климатом (GCOS, 2010). Как отмечает Всемирная метеорологическая организация, в настоящее время в глобальной системе наблюдений за климатом имеются значительные пробелы, особенно в высокогорных районах (WMO, 2019). Развивающиеся страны и страны с формирующейся экономикой не имеют таких базисных данных, которые необходимы для планирования и смягчения последствий будущих событий. Одним из регионов, где, по прогнозам, изменение климата окажет значительное влияние, является Центральная Азия (SDC, 2012), и по результатам недавних оценок, проведённых Брокардом и соавторами (Brocard et al., 2021) текущее состояние «климатических услуг» оценено как находящееся на самом низком возможном уровне, что указывает на необходимость в улучшении таких услуг в учреждениях Гидромета в Центральной Азии для реализации всех планируемых будущих мероприятий. Необходимо долгосрочное улучшение уровня понимания динамики криосферы, особенно снежного покрова, ледников и вечной мерзлоты, в горах Центральной Азии и связанной с этим проблемы обеспеченности водой стран Центральной Азии, расположенных ниже по течению, поскольку проблемы качества и количества водных ресурсов становятся всё острее, а потенциальные негативные последствия ускоренной деградации криосферы воплощаются в реальность.

Примерно в 2010 году были предприняты первые усилия по восстановлению сети мониторинга ледников в Центральной Азии, которая была в значительной степени утрачена после распада СССР. С 2010 года эти усилия продолжаются в сотрудничестве между центральноазиатскими и международными исследовательскими учреждениями с целью 1) обеспечения высокого качества научных наблюдений на современном уровне и 2) обмена знаниями и обучения молодых учёных и студентов. Сегодня наблюдения за ледниками в регионе представлены достаточно плотной сетью, результаты которой передаются научному сообществу через центры данных с открытым доступом. За последние 5 лет мероприятия по долгосрочному мониторингу были расширены и теперь включают наблюдения за снежным покровом и многолетней мерзлотой. Пока ещё новые первые систематические наблюдения проводятся на постоянной основе, и их данные предоставляются международному научному сообществу. Краткая информация об этих мероприятиях приведена в таблице 5.1, а сеть мониторинга показана на рисунке 5.1. В этой главе кратко описывается текущая стратегия мониторинга криосферы в Центральной Азии.

Таблица 5.1. Сеть мониторинга криосферы в Центральной Азии по состоянию на 2023 год. Обозначения: AWS = автоматическая метеостанция; SMB = баланс массы поверхности, ERT = электротомография удельного сопротивления, RST = сейсмическая рефракционная томография, BR = скважина; GST = температура поверхности земли, уровень и расход воды.

Объект	AWS _{off glader}	AWS _{on glader}	Камеры	SMB	SMB _{subseasonal}	Скорость движ. льда <i>in situ</i>	Уровень и расход воды	ERT	RST	BR	Монитор. снежного покрова	БПЛА на леднике	GST
Абрамова	с 2011	2018–2021	с 2011	1967–98, с 2011	с 2022	с 2022	с 2019	10	8	-	-	с 2022 (только язык)	с 2011
Зульмарта	с 2019	с 2023	с 2019	с 2018	с 2022		с 2022	3	2	-	-	с 2022	
Голубина	с 2013	-	с 2013	1958–1994, с 2010	с 2023		с 2021	7	3	-	-	-	
Якарча	с 2021	-	с 2021	с 2019	с 2023		с 2022	2	-	-	-	-	
Баркрак	с 2016	-	с 2016	с 2016	-		с 2023	-	-	-	-	-	
Батыш-Соок	с 2023	с 2023	-	с 2010	с 2023		с 2021	7	3	-	-	-	
№ 354	-	-	-	с 2014	с 2010	с 2023		-	-	-	-	-	
№ 457	с 2023	-	в планах на 2024	с 2020	-		с 2022	2	1	-	-	с 2022	
ГГП	-	-	-	с 2020	-		-	-	-	-	-	-	
Сангвор (водо-сбор ледника Ниссай)	с 2021	-	2021/ 2023	с 2022	-		с 2021	-	-	-	-	с 2021	с 2021
Скважина в Казахстане	в планах на 2023	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-
Скважина в Таджикистане	в планах на 2024	-	-	-	-		-	1	1	-	-	-	-
Скважина в Киргизстане (AK50/1 2022)	с 2022	-	-	-	-		-	3	3	с 2022	-	-	
Тургень-Аксу	с 1970	-	-	с 2019	-		в планах на 2024	-	-	-	-	с 2019	-
Карабаткак	с 1948	с 2014?	-	1957–1998. с 2013	-		-	-	-	-	-	-	-
Сарытор	с 1930-х (ст. Тянь-Шань)	-	-	1984–1989. с 2014	-		-	-	-	-	-	-	-
Борду	с 1930-х (ст. Тянь-Шань)	с 2017	-	с 2015	с 2017	-	-	-	-	-	-	-	-
Туюксу	с 1972	с 2018	-	с 1958	с 1958	-	-	-	-	-	-	с 1960	-
№ 599	-	-	с 2019	с 2014	-	-	с 2021	1	-	-	-	-	-

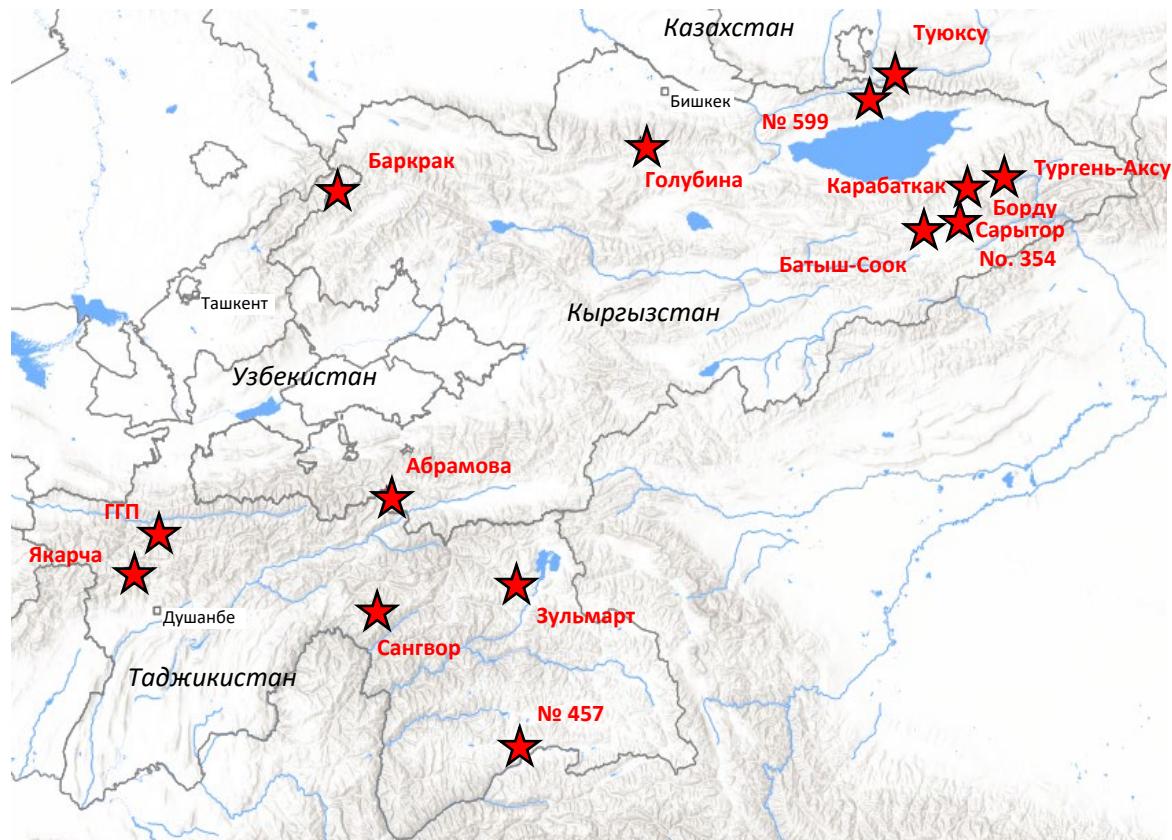


Рисунок 5.1. Площадки мониторинга криосферы в Центральной Азии.

5.1. Сеть мониторинга снежного покрова Центральной Азии

После распада Советского Союза в начале 1990-х годов многие наземные станции измерения снежного покрова были заброшены, и новая сеть наблюдений в регионе развивается медленно, особенно в отдалённых высокогорных районах. Однако процессы, происходящие в снежном покрове на больших высотах, похоже, играют большую роль в годовых водных балансах, но при этом соответствующие наблюдения в регионе редки. В настоящее время ведутся работы по восполнению пробела в наблюдениях для получения более точных оценок зимнего снежного покрова, который является одним из важнейших факторов, определяющих сезонный сток. Недавно началась реализация новой стратегии пространственно-временных наблюдений за снежным покровом с использованием карт высоты снежного покрова очень высокой точности локального масштаба (Bühler et al. 2015). Карты высоты снежного покрова составляются на основе данных беспилотных автономных летательных аппаратов (БПЛА), полученных на каждом участке мониторинга и на разных высотах. Все площадки мониторинга находятся в районе истоков важных рек или вододефицитных бассейнах, имеющих важное значение для экономики района и региона. Стратегия отбора проб направлена на выявление климатической изменчивости между основными бассейнами, и неоднородности внутри бассейнов в связи с высотой над уровнем моря. Эти новые средства обработки данных будут использоваться вместе с традиционными видами наблюдений, проводимыми на восстановленных (работа продолжается) автоматических снегомерных постах, и спутниковыми данными, а также результатами мультимодального прогнозного моделирования для получения непрерывных пространственно-временных оценок количества запасов воды, содержащихся в снежной массе, или водного эквивалента снега — наиболее важного показателя снежного покрова, который необходим водохозяйственным организациям для обоснования гидрологических прогнозов.

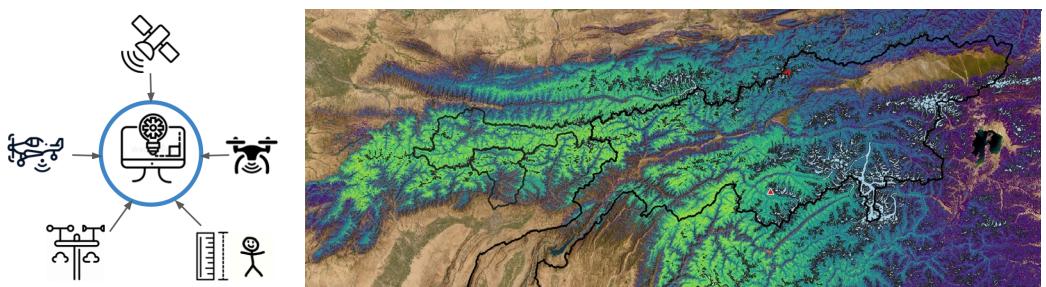


Рисунок 5.1.2. (Слева) стратегия мониторинга снежного покрова, применяемая в настоящее время в рамках проекта CROMO-ADAPT, использует данные новых и традиционных методов наблюдения вместе с оценками снежного покрова на основе моделирования для получения (справа) непрерывных пространственно-временных оценок водных ресурсов, содержащихся в сезонном снежном покрове.

Проект SAPPHIRE Central Asia (Smart & Precise Prognostic Hydrology for Innovative Risk Management and Resource Use Efficiency in Central Asia — «Умная и точная прогностическая гидрология для инновационного управления рисками и эффективности использования ресурсов в Центральной Азии»), поддерживаемый Швейцарским агентством по развитию и сотрудничеству, представляет собой инициативу по содействию национальным гидрометеорологическим службам Центральной Азии в использовании современных технологий автоматического или дистанционного мониторинга, например, обработки и оперативного использования высокочастотных данных с современных измерительных станций. В рамках этого проекта специалисты CROMO-ADAPT внедряют систему оперативного отслеживания состояния снежного покрова в масштабе бассейна, которая в режиме реального времени сравнивает смоделированные значения водного эквивалента снега со средними климатическими показателями для выявления аномалий на больших территориях (рис. 5.1.2.), обеспечивая анализ водного эквивалента снега в течение снежного сезона в масштабах бассейна

в регионе (рис. 5.1.3) (Fiddes et al. 2019). Важная проблема, которую решает этот проект, — как интегрировать современные потоки данных и средства обработки данных в методы прогнозирования советской эпохи.

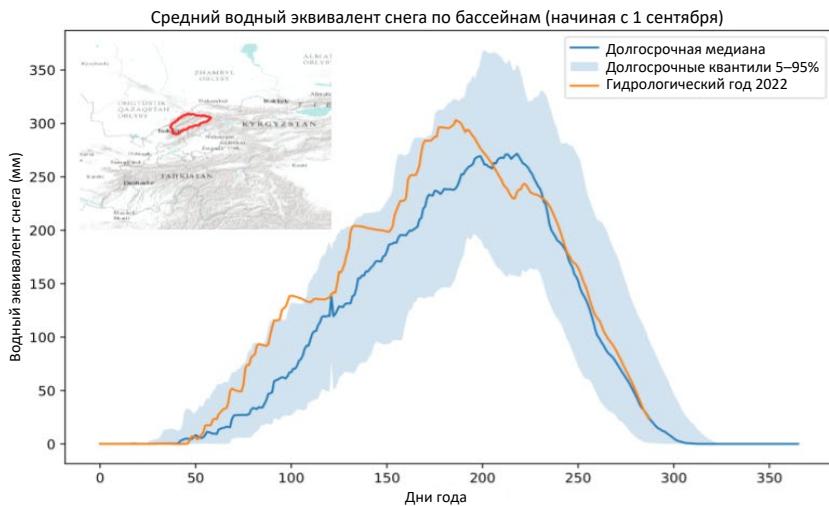


Рисунок 5.1.3. Система отслеживания состояния снежного покрова, использующая сочетание средств моделирования и дистанционного зондирования для анализа аномалий водного эквивалента снега в масштабе бассейна в режиме реального времени (Fiddes et al. 2019)

Помимо водохозяйственных задач, сведения о состоянии снежного покрова, конечно, важны и для целей снижения риска бедствий, в первую очередь из-за снежных лавин зимой и весной. В таком случае стратегия мониторинга CROMO-ADAPT сосредоточена на ключевых транспортных маршрутах, объектах инфраструктуры и населённых пунктах, подверженных опасностям. В рамках проекта система автоматических метеостанций на существующих лавинных станциях Кыргызгидромета модернизируется с тем, чтобы на ней можно было запустить лавинную модель SNOWPACK Швейцарского федерального института исследования снега и лавин. Тогда можно будет начать процесс оценки современных моделей прогнозирования опасности и их использования в существующих схемах принятия решений советской эпохи. Вторым важным аспектом снижения опасности снежных лавин, помимо прогнозирования, является зонирование опасности. Кыргызгидромет определил два населённых пункта, находящихся в зоне риска, для которых будет запущена модель определения динамики снежных лавин RAMMS Швейцарского федерального института исследования снега и лавин, чтобы составить карты опасных зон на основе сценариев с подробным описанием зоны поражения, ударной силы и глубины выноса потенциальных лавин. Эти пилотные участки послужат демонстрацией современных методов зонирования опасности, которые могут быть масштабированы на национальном уровне после получения цифровой модели рельефа среднего разрешения (<5 м).

5.2. Сеть мониторинга ледников Центральной Азии

В 1950-х годах под эгидой Комитета СССР по проведению Международного гидрологического десятилетия была заложена обширная система мониторинга ледников, и в последующие десятилетия охват системы измерений наращивался (Dyurgerov, 2002; Кузьмиченок, 2009). Большинство программ мониторинга *in situ* было прекращено с распадом СССР. Данные мониторинга обычно публикуются на русском языке. Большинство данных не представлены в цифровом виде, а доступ к архивам часто ограничен. Только на двух ледниках Тянь-Шаня деятельность по мониторингу была продолжена после распада СССР в середине 1990-х годов: леднике Тюксу, Казахстан, и леднике Урумчи, Китай. Для этих

двух ледников существуют практически непрерывные ряды баланса массы с середины 1950-х годов (WGMS, 2020). Работа по восстановлению мониторинга ледников *in situ* на других ранее наблюдавшихся ледниках началась примерно с 2010 года (Hoelzle et al., 2017, 2019; Barandun et al., 2020). Стратегия мониторинга соответствует международным рамочным принципам Глобальной сети мониторинга ледников (GTN-G).

Сегодня сеть мониторинга ледников действует в Казахстане, Кыргызстане, Таджикистане и Узбекистане и в основном осуществляется силами учёных из Центральной Азии. Создана необходимая инфраструктура (табл. 5.1), которая поддерживается в рабочем состоянии. Данные передаются в региональные и международные базы данных. Сегодня восстановленная сеть вновь охватывает большинство географических и климатических зон, что позволяет значительно улучшить понимание влияния изменения климата на ледники в Центральной Азии и способствует повышению точности оценок изменений стока и опасностей, связанных с ледниками. Однако многие из объектов сети мониторинга ещё относительно новые, и поддержание их работы на долгосрочной основе имеет первостепенное значение.

Возобновление долгосрочного мониторинга ледников обеспечивает основу для адекватного устранения существующих пробелов и улучшения понимания реакции ледников на происходящие изменения климата на Тянь-Шане и Памире (рис. 5.2.1). Имея сегодня такую основу мониторинга ледников, можно сосредоточиться на улучшении понимания процессов, определяющих наблюдаемую реакцию ледников на происходящие изменения климата с высоким временным и пространственным разрешением. В настоящее время ведётся работа по модернизации оборудования и дополнению базовой инфраструктуры новыми и экспериментальными установками для улучшения понимания процессов. К ним относятся GPS-станции для мониторинга динамики ледников, а также мониторинг атмосферных переменных на поверхности ледника *in-situ* в суточном масштабе. Это поможет лучше понять текущее поведение ледников и, в конечном счёте, их будущую реакцию, а также вклад талых вод в общий объём речного стока, являющийся основным ресурсом пресной воды в летний период в Центральной Азии и за её пределами.

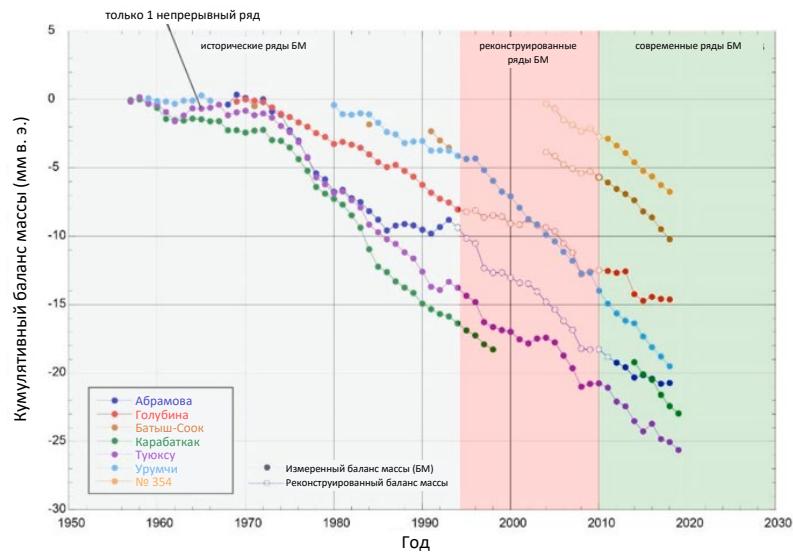


Рисунок 5.2.1. Возобновлённые наблюдения за балансом массы ледников в Центральной Азии
(по материалам Barandun et al., 2020)

5.3. Сеть мониторинга многолетней мерзлоты Центральной Азии

Многолетняя мерзлота признана одной из основных климатических переменных (ОКП) Глобальной системы наблюдений за климатом Всемирной метеорологической организации. Глобальная сеть мониторинга криолитозоны (GTN-P) является основной международной программой, посвящённой долгосрочному мониторингу мерзлоты. Основная миссия GTN-P заключается в создании устойчивой, всеобъемлющей сети долгосрочного мониторинга для получения последовательных, репрезентативных и высококачественных долгосрочных рядов данных по индикаторным переменным (производные ОКП) на расположенных по всему миру ключевых участках и для оценки состояния и изменения многолетней мерзлоты с течением времени.

Исследования многолетней мерзлоты в высокогорьях начались только в конце XX века, но с тех пор был достигнут значительный прогресс в понимании процессов горной многолетней мерзлоты (Горбунов, 1978; Haeberli et al., 2010). По мере изменения климата многолетняя мерзлота, определяемая как грунт, температура которого не поднимается выше 0 °C в течение двух лет подряд, потеплела во многих регионах мира. Процесс оттаивания многолетней мерзлоты сопряжён с различными опасностями, включая дестабилизацию скальных откосов, увеличение количества наносов в реках, просадку грунта и изменения в гидрологических режимах подземных вод (Daanen et al., 2011; Haeberli et al., 2017; Ravanel et al., 2017). Таким образом, существует настоятельная необходимость более глубокого понимания распределения объёмов многолетней мерзлоты и грунтового льда, а также оценки эволюции их теплового состояния в условиях меняющегося климата. Было показано, что потепление (горной) многолетней мерзлоты происходит в глобальном масштабе (Biskaborn et al., 2019). Во многих относительно легкодоступных регионах многолетней мерзлоты, таких как регион реки Маккензи в Канаде, север Аляски или Швейцарские Альпы, уже ведётся очень хорошо организованный мониторинг (рис. 5.3.1). Основная задача — продолжать работу существующих мониторинговых площадок с длительным периодом наблюдений и, где это необходимо и возможно, модернизировать оборудование. Также важно увеличить количество участков в странах с небольшим пространственным охватом мониторинга. К ним относятся регионы Тянь-Шаня и Памира. Системы мониторинга, предоставляющие базисные данные (такие как температура грунта, например, из скважин) для оценки будущей водности и опасностей, связанных с многолетней мерзлотой, в отдалённых регионах, таких как Центральная Азия (особенно Тянь-Шань или Памир в Кыргызстане, Узбекистане, Таджикистане), всё ещё в значительной степени отсутствуют (Hoelzle et al., 2019; Barandun et al., 2020).

Площадь многолетней мерзлоты в Центральной Азии и на Тибетском нагорье составляет около $3,5 \times 10^6$ км². Это соответствует примерно 15 % от общей площади многолетней мерзлоты в Северном полушарии (Марченко и соавт., 2007). Тем не менее, о распределении многолетней мерзлоты, текущих тепловых условиях грунта и содержании грунтового льда в Центральной Азии известно очень мало. В основном это связано с отсутствием базисных данных наблюдений *in situ* (Barandun et al., 2020), а также с небольшим количеством результатов дистанционного зондирования или модельных исследований, посвящённых многолетней мерзлоте в Центральной Азии. Первые систематические измерения температуры многолетней мерзлоты в Северном Тянь-Шане начались в 1973 году (Горбунов и Немов, 1978). Первые геотермические наблюдения (1974–1977 гг.) в скважинах Северного Тянь-Шаня показали, что температура многолетней мерзлоты в рыхлых отложениях и коренных породах на высоте 3300 м над уровнем моря варьирует от -0,3 °C до -0,8 °C (Горбунов и Немов, 1978). Марченко и соавторы (Марченко и соавт., 2007) на основе анализа 24 термометрических скважин глубиной от 3 м до 300 м на разных высотах обнаружили повышение температуры многолетней мерзлоты от 0,3 °C до 0,6 °C в горах Тянь-Шаня, а также увеличение деятельного слоя в среднем на 23 % по сравнению с началом 1970-х

годов. Данные о распространении многолетней мерзлоты и её тепловом состоянии на Памире ещё более скучны (Barandun et al., 2020). Здесь многолетняя мерзлота описана до высоты 3800 м над уровнем моря. Прогнозы для более обширной территории Тибетского нагорья, в большинстве исследований включающей часть Памира, предполагают сокращение многолетней мерзлоты на 39 % к 2050 году и на 81 % к 2100 году (Guo et al., 2012; Bolch et al., 2019).

Предпринятые в последнее время усилия позволили возобновить мониторинг многолетней мерзлоты в рамках новой сети наблюдений за криосферой Центральной Азии (рис. 5.3.1). Эти мероприятия осуществляются в соответствии с международными рамочными принципами Глобальная сеть мониторинга криолитозоны (GTN-P) и программы Глобальной системы наблюдения за криосферой (Global Cryosphere Watch, GCW) Всемирной метеорологической организации. Расширение сети за счёт включения участков в районах с небольшим количеством данных или их полным отсутствием заполнит критические пробелы в данных и поможет углубить понимание и возможности моделирования реакции многолетней мерзлоты на изменение климата. Для целей моделирования большое значение имеет получение данных дополнительных наблюдений за активными геоморфологическими процессами на поверхности (например, деформация и движение склонов, развитие термокарста и озёр, эрозия берегов и нестабильность ландшафта).

Постоянный мониторинг должен быть направлен на устранение существующих пробелов в понимании динамики многолетней мерзлоты. Это позволит обеспечить целостное понимание и согласованный подход к мониторингу вклада криосферы в региональные водные балансы и профили рисков. Цель состоит в постепенном создании новой инфраструктуры наблюдений за многолетней мерзлотой для систематического отслеживания изменений вечной мерзлоты на Тянь-Шане и Памире (рис. 5.3.2). Предусматривается устройство скважин, установка регистраторов приповерхностной температуры грунта и проведение повторных геофизических исследований для создания региональной сети наблюдений за мерзлотой. Мониторинг многолетней мерзлоты жизненно важен для населения, проживающего в горных хребтах Центральной Азии, и преследует две важнейшие цели: во-первых, деградация многолетней мерзлоты сильно влияет на устойчивость склонов и оказывает воздействие на инфраструктуру в регионе, а также повышает риск камнепадов и оползней; во-вторых, многолетняя мерзлота может выступать в качестве резервуара, хранящего воду в виде грунтового льда. При оттаивании мерзлота высвобождает воду, внося свой вклад в водоснабжение региона. Поэтому более глубокое понимание условий многолетней мерзлоты крайне важно для задач управления водными ресурсами.

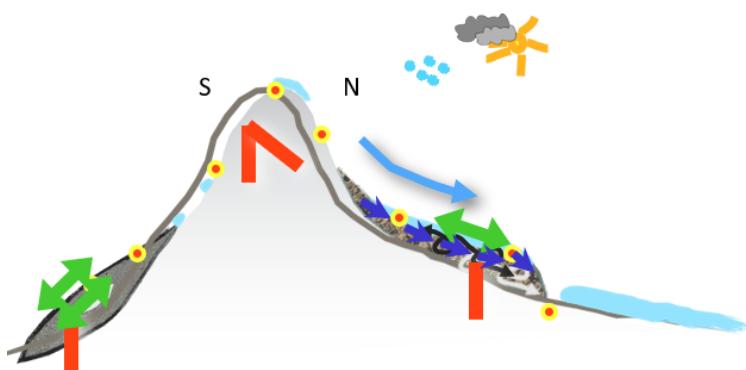


Схема стратегии наблюдений PERMOS

Рис. J. Noetzli

Рисунок 5.3.1. Стратегия мониторинга многолетней мерзлоты включает скважины (красные столбики) для измерения подповерхностной температуры, геофизические измерения (ERT и RST: зелёные

стрелки), измерения температуры поверхности грунта (GST: жёлто-красные точки) и наблюдение за кинематикой многолетней мерзлоты (синие стрелки).

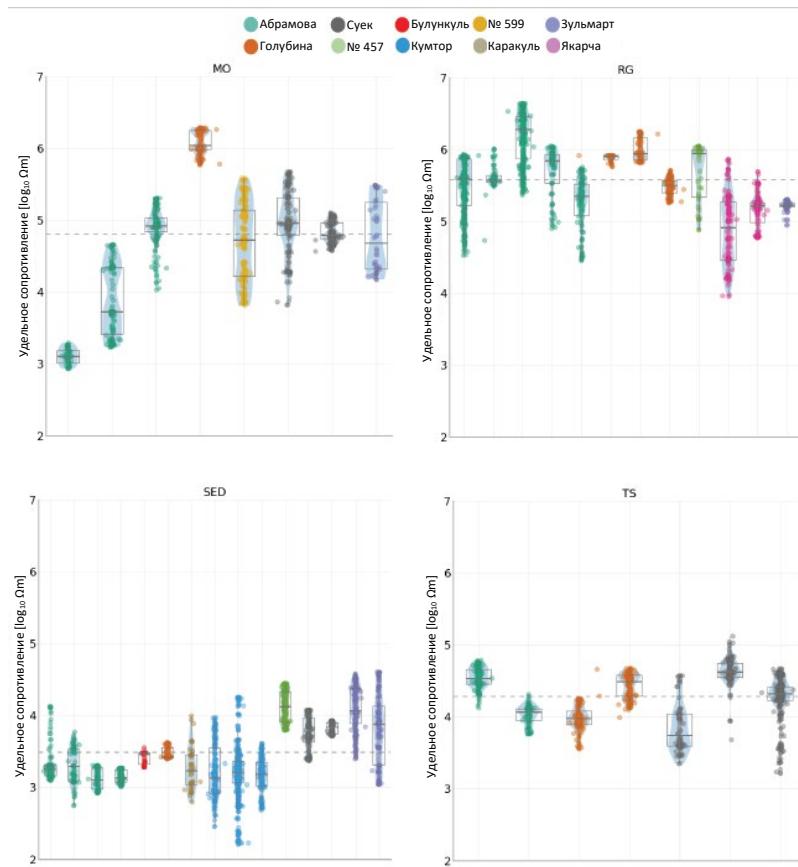


Рисунок 5.3.2. Распределение удельного сопротивления, измеренное в различных формах рельефа (RG = каменные глетчеры, TS = осыпные склоны, SED = мелкозернистые или покрытые растительностью отложения, MO = морены) на различных участках исследований. Повторные измерения удельного сопротивления в рамках сети непрерывного мониторинга позволят выявить изменения удельного сопротивления, которые могут быть связаны с потерей льда и/или увеличением количества воды в грунте (в случае уменьшения удельного сопротивления грунта).

5.4. Сеть гидрологического мониторинга Центральной Азии

Наборы гидрометеорологических данных для различных климатических зон Центральной Азии скучны и имеют большие неопределённости, что ограничивает понимание гидрологии неоднородных горных ландшафтов региона. Различия в реакции ледников на изменение климата очевидны, но понимание глубинных процессов в динамике ледников и образования талых вод, связанных с метеорологическим воздействием, ограничено. Острая нехватка гидрометеорологических и гляциологических данных препятствует достоверному моделированию соответствующих гляциогидрологических процессов, а значит, и обоснованному прогнозированию водообеспеченности региона и эволюции ледников в будущем.

Создание сети мониторинга прогляциальных потоков направлено на получение информации о динамике ледников с высоким временным разрешением для определения конкретных взаимосвязей между метеорологическим воздействием и реакцией ледников, в частности, выделением талой воды, в различных климатических зонах Центральной Азии. Выбор мест проведения работ обусловлен (вновь) созданной трансграничной сетью пунктов проведения гляциологических измерений в Центральной

Азии. Это позволяет получить доступ к долгосрочным гляциологическим и метеорологическим наблюдениям, существующей полевой логистике и экспертным знаниям учёных из Центральной Азии. В настоящее время на восьми ледниковых площадках установлены станции гидрологического мониторинга, состоящие из датчиков уровня воды, которые калибруются по расходам воды дважды в год, и проводятся многочисленные эксперименты с флуоресцентным красителем в течение полевого сезона (рис. 5.4.1).

Беспрецедентная полнота объединённого набора данных баланса массы ледников, метеорологических и гидрологических наблюдений в конечном итоге позволит улучшить и определить гляциогидрологические модели, способные точно представлять гидрологический цикл в различных климатических зонах Центральной Азии и её неоднородных ледниках (термический режим, высота, экспозиция склонов, обломочный покров). Таким образом, эти данные послужат основой для улучшения базовых знаний об отображении процессов, их масштабируемости и возможности генерализации знаний, что важно для исследований по оценке водных ресурсов в региональном масштабе, а также набором данных для улучшения и проверки методов крупномасштабного дистанционного зондирования.



Рисунок 5.4.1. Измерения расхода воды с помощью трассирующего флуоресцентного красителя и флуориметра FL-30, повторяемые при различных уровнях воды в течение дня (вверху). Результирующий временной ряд расхода в часовом временном разрешении калиброванного уровня воды (измерительные преобразователи давления марки НОВО; на фотографии не видны).

5.5. Сбор и распространение данных

Собранные данные воссозданной сети мониторинга криосферы должны быть полностью доступны как в национальных, так и в международных центрах данных, таких как сети GTN-P, GTN-G (Всемирной службы мониторинга ледников) или GCW. Текущие данные мониторинга ледников уже находятся в открытом доступе в международной структуре баз данных. Однако задача создания общей национальной системы криосферного мониторинга с несколькими комплексными участками мониторинга криосферы ещё не до конца решена и требует дальнейшего развития (реализация веб-доступа к данным). Подобные системы сегодня имеются на других международных площадках мониторинга, таких как GLAMOS и PERMOS в Швейцарии, что позволяет обеспечить открытый доступ к высококачественным данным для национального и международного научно-исследовательского сообщества и заинтересованных сторон.

Собранные высококачественные данные о криосфере используются для улучшения управления водными ресурсами и снижения риска стихийных бедствий. Например, для района Верхнего Нарына был смоделирован вклад талых вод ледников в сток реки Нарын. Полученные результаты в дальнейшем

будут использованы для улучшения параметризации моделирования стока реки Нарын, результаты которого используются многочисленными заинтересованными сторонами, что способствует улучшению климатического обслуживания в стране.

ГЛАВА 6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

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. Множество сетей климатических наблюдений охватывают нашу планету. Вместе они образуют Глобальную систему наблюдений за климатом, которая отслеживает все необходимые параметры, что позволяет нам лучше понять климатическую систему, повысить качество климатических услуг и лучше подготовиться к будущим изменениям.

Глобальная сеть мониторинга ледников (GTN-G) и Глобальная сеть мониторинга криолитозоны (GTN-P) — две всемирные сети мониторинга, предоставляющие временную и пространственную информацию о состоянии и изменениях в масштабах от локальных до глобальных с различными уровнями точности и неопределенности (WGMS, 2023; Стрелецкий, 2021). Эти две сети и их стратегии мониторинга составляют основу для проектирования Сети мониторинга криосферы в Центральной Азии.

6.1. Мониторинг снежного покрова

Сезонный снежный покров является основным компонентом годового водного бюджета в Центральной Азии, причём водный эквивалент вклада снега оценивается более чем в 50% для крупных бассейнов и до 65–72 % для меньших бассейнов (Armstrong et al., 2019). Это резко контрастирует с 23 % вкладом осадков и 2–8 % вкладом ледникового льда в годовой сток (Sorg et al., 2012, Aizen et al., 1995).

В большинстве исследований, посвящённых влиянию климата на снежный покров в Центральной Азии в последнее время, для количественной оценки площади снежного покрова использовались оптические спутники дистанционного зондирования (Gafurov et al., Zhou et al., 2017). По данным этих исследований, основанных на наборах данных о протяжённости снежного покрова радиометров AVHRR и MODIS, дистанционный мониторинг снежного покрова показал значительное сокращение количества дней со снегом на поверхности земли в Центральной Азии с 1986 по 2008 год. Результаты исследования с использованием данных спутникового пассивного микроволнового зондирования, охватывающего период 1986–2008 гг., проведённого Манкиним и соавторами (Mankin et al., 2015), показали уменьшение продолжительности снежного покрова и максимальной высоты снежного покрова в западной и восточной частях Тянь-Шаня, но увеличение высоты снежного покрова в Центральном Тянь-Шане, что было связано с увеличением количества зимних осадков. Исследователи также обнаружили высокий риск того, что к середине века таяние снега перестанет удовлетворять летний спрос в бассейнах Центральной Азии. Увеличение ледникового стока может компенсировать сокращение снежного покрова до середины столетия, когда во многих районах Центральной Азии ожидается пик водности (Huss and Hock 2018, Rounce et al., 2020). Во второй половине столетия сток, по всей видимости, будет сокращаться по мере уменьшения как снежного, так и ледникового компонентов.

Способность чёрного и органического углерода и других светопоглощающих примесей изменять поверхностный энергетический баланс снежного покрова представляет растущий интерес в контексте антропогенного изменения климата. Поскольку вблизи Тянь-Шаня и Памира расположено множество растущих промышленных центров, светопоглощающие примеси всё чаще откладываются в сезонных снежных покровах (Schmale et al., 2017).

Снежные лавины — ещё один аспект снежного покрова в Центральной Азии, который сильно влияет на жизнь людей. Совсем недавно, весной 2023 года, в Горно-Бадахшанской автономной области серия

снежных лавин привела к повреждению нескольких домов и гибели 10 человек¹⁷. В советское время вдоль основных горных дорог в Центральной Азии была создана сеть станций мониторинга лавин, которые отвечали за раннее оповещение и смягчение последствий лавин. За последние десятилетия из-за нехватки финансирования и технического обслуживания многие из этих станций были закрыты или их функции были сокращены, что привело к росту лавинной опасности в регионе, особенно в Таджикистане.

Наши знания о величине, динамике и климатических нормах снежного покрова в этом регионе всё ещё очень ограничены из-за удалённости местности, малого количества наблюдений *in situ* и зачастую низкой эффективности числовых моделей. Полевые измерения высоты и плотности снежного покрова регулярно проводились в советское время, однако в большинстве последних исследований основное внимание уделяется параметру площади снежного покрова, который можно уверенно отслеживать на обширных территориях с помощью средств спутникового зондирования (например, Hock et al., 2019). Другими ключевыми параметрами являются водный эквивалент снега и динамика накопления и таяния во времени. Оценка водного эквивалента снега остаётся одной из основных задач гидрологии снега (Gafurov et al., 2013), в основном из-за сложности количественной оценки (твёрдых) осадков, особенно на больших высотах (Dozier et al. 2017; Guggerli et al. 2019, 2021, 2022). В целом, режим осадков на больших высотах в Центральной Азии остаётся в значительной степени неисследованным (Immerzeel et al., 2015). Наблюдения *in situ* скучны (и часто весьма неопределённы из-за недоучёта), особенно на больших высотах, что приводит к высокой степени неопределённости в наборах данных, основанных на наблюдениях.

Будущая стратегия мониторинга снежного покрова в Центральной Азии должна быть сосредоточена на восстановлении некогда действовавшей сети снегомерных реек, управляемой национальными гидрометеорологическими службами, и совмещении результатов работы этой сети с современными методами и подходами, такими как съёмки с БПЛА, средства дистанционного зондирования, мюонные или нейтронные датчики космических лучей, которые вместе могут использоваться для получения более точных оценок водного эквивалента снега. Параллельно с этим на повестке дня должны стоять вопросы лавинной опасности и раннего предупреждения, включая поддержание и восстановление существующих станций мониторинга лавин в сочетании с новыми технологиями мониторинга лавинной опасности и раннего предупреждения.

6.2. Мониторинг ледников

Ледники в Центральной Азии выполняют важнейшую роль в сухой сезон с июля по сентябрь, когда сток в неледниковых бассейнах уменьшается из-за снижения количества осадков и повышения температуры, и речной сток в основном зависит от вклада талых вод ледников (Aizen et al., 1995; Armstrong et al., 2019). Вклад талых вод ледников в вегетационный период может увеличиваться до более чем 70–90 % (Huss & Hock, 2019; Saks et al., 2021). Реакция ледников в Центральной Азии неоднородна в зависимости от территории и времени; таким образом, изменения вклада талых вод варьируются от водосбора к водосбору, что влияет на водообеспеченность горных районов. Гетерогенные изменения величины и сезонности речного стока в результате изменения режимов таяния ледников в сочетании с экстремальными погодными явлениями делают задачу управления водными ресурсами чрезвычайно сложной. Зачастую не хватает подробных количественных сведений, необходимых для эффективного

¹⁷ Reuters, 'Avalanches kill 10 people in Tajikistan' («Рейтер»: «В результате схода лавины в Таджикистане погибли 10 человек») [только на англ.] <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/avalanches-kill-10-people-tajikistan-2023-02-15/>

управления рисками, особенно для отдалённых районов. В Центральной Азии это связано со скучностью прямых наблюдений за водными ресурсами высокогорных районов, отсутствием инструментов для переноса результатов местных наблюдений на масштаб региона и недостаточностью климатических данных для прогнозов на будущее.

Исследования ледников в Центральной Азии имеют давнюю историю, первые наблюдения были начаты ещё в XIX веке (Глазырин и соавт., 1988). Первые измерения баланса массы на ледниках были начаты в 1950-х годах в Казахстане и Киргизии. Руководство СССР осознавало, что богатые водные ресурсы Киргизии и Таджикистана, а также благоприятный рельеф местности делают эти республики хранищами запасов воды и обладателями большого гидроэнергетического потенциала. В то же время обширные низменные степи в среднем и нижнем течении Сырдарьи и Амударьи можно превратить в центры орошаемого сельскохозяйственного производства (Dukhovny and Sokolov, 2003; Савоскул и соавт., 2003). Таким образом, СССР начал развивать крупномасштабное орошаемое сельскохозяйственное производство, особенно производство хлопка и пшеницы, в сталинский период и при Хрущёве в середине 1950-х годов (Bernau & Sigfried 2012). Эта деятельность была значительно расширена в ходе Международного гидрологического десятилетия — исследовательской программы по проблемам воды, которая началась 1 января 1965 года в соответствии с резолюцией Организации Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО), принятой в ноябре 1964 года. После распада Советского Союза объём финансирования научных исследований ледников был очень ограничен, что привело к резкому сокращению научных исследований криосферы, а также сокращению или даже прекращению ряда программ мониторинга. К концу 1990-х годов мониторинг ледников был сведён только к одному леднику: Туюксу. Международным сообществом были предприняты усилия по возобновлению мониторинга ледников (Hoelzle et al., 2017), а затем и по созданию новых пунктов мониторинга ледников, в основном на Памире (Barandun et al., 2020). На основе объединения результатов работы этих ценных объектов долгосрочного мониторинга с возможностями средств дистанционного зондирования и методами численного моделирования было показано, что изменчивость баланса массы ледников увеличивается в большинстве горных регионов Центральной Азии (Barandun et al., 2021).

В настоящее время мониторинг баланса массы ледников проводится во всех горных странах Центральной Азии, и данные ежегодно представляются во Всемирную службу мониторинга ледников (WGMS, 2023). Созданная в настоящее время сеть мониторинга ледников относительно хорошо распределена по различным субрегионам Центральной Азии, однако в ней всё ещё имеются пробелы, например, в Джунгарском Алатау (Barandun et al., 2021). Существующая организация мониторинга является экономически эффективной для национальных партнёров. В настоящее время необходимы меры по обеспечению устойчивости работы созданной сети мониторинга как на национальном, так и на региональном уровнях. Кроме того, на текущих объектах мониторинга должны проводиться специальные научные мероприятия с участием национальных и международных научных кругов для углубления детального понимания процессов, например, наблюдения за керном фирна (Kronenberg et al., 2021), мониторинг температуры ледникового льда или непрерывной абляции, мониторинг скорости течения ледников или детальные наблюдения за альбедо. Для этого необходимо обновить существующую инфраструктуру мониторинга, оснастив её современными приборами и экспериментальными измерительными установками.

Дистанционное зондирование — это мощный инструмент для изучения труднодоступных ледников из космоса, однако оценки изменений массы пока ограничены интервалами от 5 до 10 лет (Kääb et al., 2015; Brun et al., 2017; Shean et al., 2020). Таким образом, геодезические исследования не позволяют оценить изменчивость годового баланса массы конкретного ледника, но дают хороший обзор изменений массы

ледника в масштабах десятилетнего и пятилетнего периодов (например, Denzinger et al., 2021; Kronenberg et al., 2016; Kapitsa et al., 2022). С улучшением возможностей средств зондирования и повышением временной и пространственной разрешающей способности методы дистанционного зондирования быстро развиваются и предоставляют всё больше инструментов для систематического наблюдения за прямыми изменениями ледников, а также за косвенными параметрами реакции ледников на изменение климата. Например, дистанционное зондирование позволяет эффективно и на больших территориях проводить картирование снежной линии. Различные методы позволяют автоматически различать снег и лёд на оптических спутниковых снимках высокого и среднего разрешения (например, Landsat; Naegeli et al., 2019; Rastner et al., 2019). В других исследованиях для создания региональных карт снежного покрова используются оптические снимки с более низким разрешением (например, с использованием визуализирующего спектрорадиометра среднего разрешения (MODIS)) (Notarnicola et. al, 2013). Однако существующие средства, использующие оптические датчики, всё ещё имеют существенные недостатки, связанные с облачностью и тенями. Изображения радиолокатора с синтезированной апертурой (SAR) доказали свою пригодность для очерчивания временной снежной линии (Winsvold et al., 2018). Сочетание данных SAR и оптических данных показывает уникальный потенциал для более эффективного мониторинга истощения снежного покрова. Каллегари и соавторы (Callegari et al., 2016) получили карты снежного покрова из изображений SAR и оптических изображений с помощью самообучающейся машины опорных векторов. Однако разработка по классификации изображений из нескольких источников всё ещё находится на ранней стадии и пока не нашла широкого применения в гляциологии. Сегодня необходима стратегия для непосредственной интеграции средств классификации спутниковых изображений из нескольких источников в практику прикладной гляциологии. Кроме того, необходимы стандартизованные инструменты для такого применения дистанционного зондирования и соответствующее обучение, чтобы местные учёные и заинтересованные стороны могли пользоваться готовыми к использованию приложениями.

6.3. Мониторинг многолетней мерзлоты

Многолетняя мерзлота — это грунт как верхняя часть литосферы, температура которого не поднимается выше 0 °C в течение двух лет подряд (van Everdingen, 1998). Потенциальное воздействие атмосферного потепления на горную многолетнюю мерзлоту и влияние на устойчивость склонов в альпийском рельефе до 1990-х годов было мало изучено (Haeblerli, 1992). С развитием туризма и строительством инфраструктуры, такой как станции канатных дорог и туристические объекты, процессы глобального потепления отразились на изучении распространения многолетней мерзлоты и её теплового режима в высокогорных районах. Возникла потребность в углублении знаний о 1) распространённости горной мерзлоты, 2) тепловом состоянии и толщине мерзлоты, а также 3) реакции многолетней мерзлоты на изменение климата. Поиск ответов на эти вопросы привёл к возникновению европейских и центральноазиатских научно-исследовательских инициатив (Harris et al., 2009; Marchenko, 2003; Марченко и Горбунов, 2007). Основными задачами являются мониторинг температуры грунта в разрезах скважин, разработка методов картирования и моделирования горной многолетней мерзлоты и оценка опасностей, связанных с потенциальной деградацией вечной мерзлоты.

Центрально-Азиатский регион — крупнейший в мире район горной многолетней мерзлоты, охватывающий часть Южной Сибири, Монголии, Китая, Казахстана и соседних стран. Его площадь составляет $3,5 \times 10^6 \text{ км}^2$, около 15 % от общей площади многолетней мерзлоты в северном полушарии. С одной стороны, северный Тянь-Шань имеет долгую историю изучения многолетней мерзлоты, ещё с 1960-х годов, когда были начаты первые наблюдения за температурой грунта на перевале Джусалы-Кезень в Заилийском Алатау в Казахстане (Марченко и Горбунов, 1997; Марченко, 1999, 2001; Gorbunov et al., 2004). Наблюдения там ведутся непрерывно с момента начала мониторинга (Горбунов, 1978;

(Marchenko, 2003; Severskiy, 2017). С другой стороны, исследования многолетней мерзлоты на остальной территории Тянь-Шаня и Памира крайне скучны. В 1980-х годах мониторинг многолетней мерзлоты проводился в долине Кумтор, массив Акшийрак, Кыргызстан, в нескольких скважинах и позже посредством измерений температуры на поверхности. На остальной территории Тянь-Шаня и Памира в Центральной Азии имеются лишь единичные наблюдения за состоянием многолетней мерзлоты (например, Горбунов и соавт., 2000). Знания о состоянии, глубине и распределении многолетней мерзлоты в настоящее время в значительной степени отсутствуют и основываются исключительно на результатах моделирования (например, Gruber et al., 2011).

Изменения теплового режима многолетней мерзлоты могут оказывать значительное влияние на гидрологию, энергетический и влажностный балансы поверхности земли, углеродный обмен между литосферой и атмосферой, экосистемы и инженерную инфраструктуру региона. Наблюдения за температурой многолетней мерзлоты на трёх участках в 1974–1977 и 1990–2009 гг. показывают, что за последние 35 лет грунт в казахстанской части гор Тянь-Шаня потепел. Повышение температуры с 1974 по 2009 год варьируется от 0,38 °C до 0,68 °C на глубине 14–25 м. Однако в настоящее время в Центральной Азии имеется только одна наблюдательная скважина, расположенная на севере Тянь-Шаня. На Памире исследования многолетней мерзлоты отсутствуют, за исключением некоторых модельных исследований и отдельных измерений.

В настоящее время проект «Криосферные наблюдения и моделирование для улучшения адаптации в Центральной Азии» (CROMO-ADAPT), финансируемый Швейцарским агентством по развитию и сотрудничеству, направлен на (повторное) создание сетей мониторинга многолетней мерзлоты в Кыргызстане, Таджикистане и Узбекистане, а также на улучшение мониторинга в Казахстане. В Кыргызстане уже оборудована скважина, в Казахстане и Таджикистане скоро тоже будут оборудованы мониторинговые скважины. Кроме того, в рамках проекта проводятся ежегодные полевые геофизические кампании по изучению многолетней мерзлоты для определения содержания льда в мерзлоте в Центральной Азии.

Таким образом, за исключением Северного Тянь-Шаня в Казахстане, исследования многолетней мерзлоты всё ещё находятся в зачаточном состоянии. Несмотря на то, что текущее сотрудничество между учёными из Центральной Азии и Швейцарии (проект CROMO-ADAPT) позволит значительно улучшить понимание состояния и распределения вечной мерзлоты на Тянь-Шане и Памире, необходимо приложить гораздо больше усилий для наращивания потенциала местных научных исследований и национальных научно-исследовательских институтов, а также для повышения осведомлённости о рисках, связанных с деградацией вечной мерзлоты в странах Центральной Азии. Одним из наиболее актуальных вопросов в настоящее время является обеспечение устойчивости исследований многолетней мерзлоты в странах Центральной Азии, поскольку, за исключением Казахстана, в настоящее время в странах Центральной Азии нет подготовленных учёных.

6.4. Вклад талых вод криосферы в общий объём речного стока

Из-за ограниченности временных и пространственных оценок криосферы и детальных изменений вклада стока по данным наблюдений, общерегиональные оценки не могут опираться только на геодезические и натурные исследования, а должны сочетаться с другими методами для изучения изменений криосферы в годовом и сезонном масштабе.

Для расчёта регионального отклика криосферы и высвобождения талых вод подходят простые модели (например, Lutz et al., 2014; Immerzeel et al., 2015). Однако эти эффективные с точки зрения вычислений модели страдают от недостаточного представления мелкомасштабных процессов, используя производные эмпирические или статистические зависимости с фиксированными параметрами (например, Rounce et al., 2020). При использовании региональных моделей часто не учитываются соответствующие процессы (например, сублимация, теплоизоляционный эффект снега, пористость грунта, повторное замерзание талой воды в фирне), которые могут оказывать значительное воздействие на состояние снежного покрова, фирна и слоёв льда (например, Kronenberg et al., 2021). Более детальные модели полезны для понимания и количественной оценки роли отдельных процессов, связывающих атмосферу, криосферу и гидросферу (например, Mölg et al., 2014).

Сегодня разработка инструментов, необходимых для обеспечения масштабируемости и переносимости процессно-ориентированных моделей криосферы путём построения каскадных модельных процессов, ассимилирующих данные наблюдений из разных источников, крупномасштабные наборы данных и мелкомасштабные представления процессов, должна занять центральное место в исследованиях реакции криосферы региона на изменение климата. Наряду с разработкой моделей, обучение навыкам применения моделей и программирования также необходимо для обеспечения качественного моделирования отклика криосферы региона на изменение климата в прошлом, настоящем и будущем.

6.5. Временные ряды климатических данных

Несмотря на то, что совместные исследования в области 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), прогнозы на будущее остаются неполными из-за отсутствия адекватных моделей и данных по их коррекции или калибровке. Доминирующим источником неопределённости при моделировании поведения криосферы является воздействие метеорологических факторов. 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 погрешностям 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 погрешностей 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 погрешностей (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.

6.6. Трансграничное сотрудничество

Трансграничный характер водных ресурсов в Центральной Азии подчёркивает необходимость в согласованных и скоординированных усилиях стран региона. Каждая страна сталкивается с уникальными проблемами и полагается на различные источники воды, поэтому совместный мониторинг криосферы и обмен данными имеют решающее значение для достижения понимания и реагирования на динамические изменения в криосфере региона.

Учитывая разнообразие потребностей стран Центральной Азии в водных ресурсах, чрезвычайно важно применять совместный подход к мониторингу криосферы. Создание единой сети мониторинга криосферы на основе существующих стратегий, таких как Глобальная наземная сеть мониторинга ледников и Глобальная сеть мониторинга криолитозоны, может способствовать обмену опытом и ресурсами. Совместное трансграничное управление станциями наблюдений позволит повысить точность и достоверность данных и обеспечить всестороннее понимание динамики криосферы в регионе.

Чтобы обеспечить эффективность трансграничного сотрудничества, необходимо взять на себя обязательство по открытому обмену данными и стандартизации протоколов измерений. Централизованное хранилище данных, доступное для всех стран-участниц, может упростить обмен информацией. Стандартизованные методы измерений и форматы отчётности улучшат сопоставимость данных, позволят более точно оценивать региональные тенденции и будут способствовать достижению общего понимания состояния криосферы.

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 (Karatayev et al., 2017). Кыргызстан в значительной степени полагается на криосферные ресурсы для целей орошения (Hill et al., 2017; Saks et al., 2022; FAO, 2016), Узбекистан почти на 90% использует талые воды снегов и ледников Памира и Тянь-Шаня для орошения (Жумаева, 2021). Туркменистан сталкивается с проблемой нехватки воды, которая усугубляется изменением климата, и находится в сильной зависимости от реки Амударья (Zonn, 2012). Таджикистан, являющийся крупным поставщиком воды в Амударью, в основном зависит от своей обширной криосферы (Духовный и соавт., 2014).

Трансграничное сотрудничество имеет решающее значение для обеспечения готовности к стихийным бедствиям, особенно в районах, подверженных сходу лавин и другим опасностям, связанным с криосферой. Создание и обслуживание станций мониторинга лавин и внедрение современных технологий, таких как съёмка с помощью БПЛА и дистанционное зондирование, позволит укрепить системы раннего предупреждения. Такая совместная инфраструктура улучшит координацию мер реагирования на стихийные бедствия и сведёт к минимуму их воздействие на население по разные стороны границ.

Взаимосвязь стран Центральной Азии через общие трансграничные водные ресурсы требует целостного подхода к обеспечению водной безопасности. Совместные усилия могут способствовать внедрению методов устойчивого управления водными ресурсами, обеспечивающих сохранение экосистем и биоразнообразия. Это особенно важно для таких стран, как Таджикистан, который в значительной степени зависит от своей обширной криосферы в плане водных ресурсов, а также для предотвращения дальнейшего ухудшения качества воды в бассейнах общих рек.

Эффективное управление водными ресурсами Центральной Азии требует единого подхода, учитывающего специфику задач, стоящих перед каждой страной. Трансграничное сотрудничество важно для смягчения воздействия связанных с водными ресурсами проблем на национальном уровне на сельское хозяйство, энергетику, промышленность и общее благополучие населения, а также для обеспечения водной безопасности и экологической устойчивости в Центральной Азии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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>
- 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
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Aizen, V. B. (2011). Pamir glaciers. *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Edited by: Sigh, V. P. and Singh, P., Haritashya, UK, 813-815.
- 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)
- 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.
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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.
- 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).
- 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>
- Azisov, E., Hoelzle, M., Vorogushyn, S., Saks, T., Usualiev, 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>

- 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>
- 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.
- 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>
- 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>
- Barandun, M., Huss, M., Sold, L., Farinotti, D., Azisov, E., Salzmann, N., Usualiev, R., Merkushkin, A. & Hoelzle, M. (2015). Re-analysis of seasonal mass balance at Abramov glacier 1968–2014. *Journal of Glaciology*, 61(230), 1103–1117.
- Barandun, M., Huss, M., Usualiev, R., Azisov, E., Berthier, E., Kääb, 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.
- 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>
- 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>
- Barnet, J. (2007). Climate change, human society and violent conflict. *Polit Geogr* 26(6):639–655
- Barry, R. G. (1992). Mountain weather and climate, 2nd edn., Routledge, London, ISBN 9780415071130.
- 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>
- Berger, A. (1978). Long-term variations of caloric solar radiation resulting from the Earth's orbital elements. *Quaternary Res.*, 9: 139–167.
- Bernauer, T., & Siegfried, T. (2012). Climate change and international water conflict in Central Asia. *Journal of Peace Research*, 49(1), 227–239.
- Biskaborn, B. K., Smith, S. L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletschi, 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>
- 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.
- 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.
- Bolatova, A., Kryanova, 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>
- 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>
- 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>
- 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.
- 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.

- 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>
- Boos, W. R. and Kuang, Z. (2010). Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating, *Nature*, 463, 218–222.
- 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.
- 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.
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Kääb, 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>
- 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.
- 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.
- Cadet, D. (1979). Meteorology of the Indian summer monsoon, *Nature*, 279, 761–767.
- 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>
- 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>
- 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.
- 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>
- Chevallier, P., Pouyaud, 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: 10.1080/02626667.2013.838004
- 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.
- 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.
- Daanen, R. P., Ingeman-Nielsen, T., Marchenko, S. S., Romanovsky, V. E., Foged, N., Stendel, M., Christensen, J. H., and Hornbeck 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>
- 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>
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- Denzinger, F., Machguth, H., Barandun, M., Berthier, E., Girod, L., Kronenberg, M., Usualiev, 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
- 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/rs6121275>
- 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
- Djumaboev, K., Anarbekov, O., Holmatov, B., Hamidov, A., Gafurov, Z., Murzaeva, M., Susnik, J., Maskey, S., Mahmood, H., Smakhtin, V. (2019). Surface water resources. In The Aral Sea Basin (pp. 25–38). Routledge.
- Dozier, J. (1997). Climatic and Hydrologic Changes in the Tien Shan, Central Asia. Journal of Climate, 10(6):1393–1404.
- 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>
- 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.
- Dukhovny Victor, Sokolov Vadim (2003) Lessons on Cooperation Building to Manage Water Conflicts in the Aral Sea Basin. Paris: UNESCO
- Dukhovny, V. A. & de Schutter, J. (2011). Water in Central Asia, Past, Present, Future. Routledge, Taylor & Francis Group.
- 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.
- Erokhin, S. A., Zaginaev, V. V., Meleshko, A. A., Ruiz-Villanueva, V., Petrakov, D., Chernomorets, S. S., Viskhadtzhieva, 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.
- 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
- Fay, M., and Patel, H. (2008). A Simple Index of Vulnerability to Climate Change. Background paper prepared for report, World Bank, Washington, DC.
- 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>
- 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
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2016). Country Water Report, Rome.
- 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.
- 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 (Vol. 1229, No. 1, p. 012024). IOP Publishing.
- Gafurov, A., & Bärdossy, A. (2009). Cloud removal methodology from MODIS snow cover product: Hydrology and Earth System Sciences, v. 13, no. 7, p. 1361–1373

- 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.
- Gafurov, A., Lüdtke, 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.
- 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>
- 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
- 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>
- 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.
- 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.
- Gilbert, A., Vincent, C., Gagliardini, O., Krug, J., and Berthier, E. (2015). Assessment of thermal change in cold availing glaciers in relation to climate warming, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 6382–6390, doi:10.1002/2015GL064838.
- 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>
- Glantz, M. (1999). Creeping environmental problems and sustainable development in the Aral Sea Basin. Cambridge University Press, Cambridge 5.
- Glazovsky, N. (1995). The Aral Sea basin. *Regions at Risk: Comparisons of Threatened Environments*. Tokyo, New York, Paris: United Nations University Press.
- 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>.
- 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.
- 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>
- 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>
- 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
- 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.
- 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.
- 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.

- Gulahmadov, N., Chen, Y., Gulakhmadov, A., Rakhimova, M., Gulakhmadov, 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>
- Gulahmadov, N., Chen, Y., Gulakhmadov, M., Satti, Z., Naveed, M., Davlyatov, R., ... & Gulakhmadov, A. (2023). Assessment of Temperature, Precipitation, and Snow Cover at Different Altitudes of the Varzob River Basin in Tajikistan. *Applied Sciences*, 13(9), 5583.
- 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>
- 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>
- Haeberli, W. (1992). Construction, environmental problems and natural hazards in periglacial mountain belts Permaf. *Periglac. Process.* 3 111–24
- 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>
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Halla, C., Blöthe, J. H., Tapia Baldis, C., Trombotto Liaudat, 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>.
- Hamidov, A., Helming, K., & Balla, D. (2016). Impact of agricultural land use in Central Asia: a review. *Agronomy for sustainable development*, 36, 1–23.
- Harris C, Haeberli W, Vonder Mühl 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
- 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.
- Hock, R. (1999). A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *J. Glaciol.* 45 (149), 101–111.
- 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., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer N. M. (eds.)]
- Hoelzle, M., Azisov, E., Barandun, M., Huss, M., Farinotti, D., Gafurov, A., Hagg, W., Kenzhebaev, R., Kronenberg, M., Machguth, H., Merkushkin, A., Moldobekov, B., Petrov, M., Saks, T., Salzmann, N., Schöne, T., Tarasov, Y., Usualiev, 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
- 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>

- 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
- 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.
- Huggel, C., Zgraggen-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.
- Hugonet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, 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>
- Huss, M. & Hock, R. (2015). A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science* 3, 54.
- 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
- Huss, M., Bauder, A., & Funk, M. (2009). Homogenization of long-term mass-balance time series. *Annals of Glaciology*, 50(50), 198–206.
- 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>
- 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.
- 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.
- 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., Viveroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T., Baillie, J. E. M. (2019). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*. doi:10.1038/s41586-019-1822-y
- 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.
- 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.
- 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>
- Information sheet No. 2 for the second quarter of 2021 ANEC. (2021).
- 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.
- 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.
- 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>
- 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.

- 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>
- 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.
- Kääb, 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
- Kääb, 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>
- Kääb, 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>
- Kääb, 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>
- Kaldybayev A. A., & Chen Yining. (2022). Assessment of changes in the area of glaciers in the northern part of the Zhetsu Alatau based on remote sensing data. *Bulletin of KazNU, Geographical Series*, 3(66). <https://doi.org/10.26577/JGEM.2022.v66.i3.01>
- Kaldybayev, A., Chen, Y., & Vilesov, E. (2016). Glacier change in the Karatal river basin, Zhetsu (Dzhungar) Alatau, Kazakhstan. *Annals of Glaciology*, 57(71), 11–19. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A005>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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.
- 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.
- 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
- 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>
- 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
- Kenzhebaev, R., Barandun, M., Kronenberg, M., Chen, Y., Usualiev, 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.
- 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. – Т. 2. – №. 1. – p. 89-112.

- 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>
- Kokarev A., Schesterova I., & Schröder H. (1997). Die blockgletscher im Sajilijskij Alatau des Tienschan (Kasachstan). Hallesches Jahrb. Geowiss, 19, 81–94.
- 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>
- 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
- 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>
- Kraaijenbrink, P. D., Stigter, E. E., Yao, T., & Immerzeel, W. W. (2021). Climate change decisive for Asia's snow melt-water supply. *Nature Climate Change*, 11(7), 591-597.
- 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.
- 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
- 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
- Kronenberg, M., Barandun, M., Hoelzle, M., Huss, M., Farinotti, D., Azisov, E., Usualiev, R., Gafurov, A., Petrkov, D. & Kääb, A. (2016). Mass-balance reconstruction for Glacier No. 354, Tien Shan, from 2003 to 2014. *Annals of Glaciology*, 57(71), 92-102.
- 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>
- Kronenberg, M., Barandun, M., Hoelzle, M., Huss, M., Farinotti, D., Azisov, E., & Kääb, 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>
- 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.
- Kutuzov, S., & Shahgedanova, M. (2009). Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatoos, 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>
- 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
- 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.
- Lambrecht, A., Mayer, C., Wendt, A., Floricioiu, D., & Völksen, 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
- 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.

- 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.glopla-cha.2018.12.008>
- 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>
- 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>
- Library of Congress. (2007). Country Profile: Tajikistan, January 2007. Retrieved from: <https://www.loc.gov/rr/frd/cs/profiles/Tajikistan-new.pdf>
- Lioubimtseva, E. (2002). Arid environments. *Physical Geography of Northern Eurasia*. Oxford: Oxford University Press, pp. 267–283.
- Lioubimtseva, E. Cole, R., (2006). Uncertainties of Climate Change in Arid Environments of Central Asia. *Reviews in Fisheries Science*, 14:1–2, 29–49.
- 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.
- 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>
- 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 P., <https://doi.org/10.5194/tc-13-219-2019>
- 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>
- Malsy, M., Aus Der Beek, T., Eisner, S., Florke, M., (2012). Climate change impacts on Central Asian water resources. *Adv. Geosci.* 32, 77–83.
- 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.
- Manandhar, S., Xenarios, S., Schmidt-Vogt, D., Hergarten, C., & Foggin, M. (2018). Climate vulnerability & adaptive capacity of mountain societies in Central Asia Mountain Societies Research Institute. University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan.
- Mankin, J. S., & Diffenbaugh, N. S. (2015). Influence of temperature and precipitation variability on near-term snow trends. *Climate Dynamics*, 45, 1099–1116.
- 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>
- Mannig, B., Müller, M., Starke, E., Merkenschlager, 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.glopla-cha.2013.05.008
- Marchenko, S. S. (2001). A model of permafrost formation and occurrences in the intracontinental mountains. *Norwegian Journal of Geography*, 55(4): 230–234.
- 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.
- Margulis, S. A., Girotto, 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>
- Marty, C. (2008). Regime shift of snow days in Switzerland: *Geophysical Research Letters*, v. 35, p. L12501.

- 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.
- 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>
- Maussion, F., Scherer, D., Mölg, T., Collier, E., Curio, J., & Finkelburg, 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>
- Mergili, M., Kopf, C., Müllerbner, 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>
- Micklin, P. (1988). Dessication of the Aral Sea: A water management disaster in the Soviet Union. *Science*, 241: 1170–1176.
- Micklin, P. (2010). The past, present, and future Aral Sea. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 15(3), 193–213.
- Middleton, N. (2002). The Aral Sea. *Physical Geography of Northern Eurasia*, pp. 497–510.
- 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>
- 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 coverand mapping challenges, *Earth Syst. Sci. Data* 10 (2018) 1807–1827, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1807-2018>
- 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>
- 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>
- 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.
- 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.
- 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>
- 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>
- Narama, C., Kääb, A., Duishonakunov, M., & Abdakhmatov, 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>
- Narama, C., Shimamura, Y., Nakayama, D., & Abdakhmatov, K. (2006). Recent changes of glacier coverage in the western Terskey-Alatao range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat. *Annals of Glaciology*, 43, 223–229. <https://doi.org/10.3189/172756406781812195>
- 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>
- Nurakynov, S., Kaldybayev, A., Zulpykharov, K., Sydyk, N., Merekeyev, A., Chepashev, D., Nyssanbayeva, A., Isanova, 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>
- 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

- 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>
- 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.
- Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H. H., Dashtseren, A., Delaloye R, Elberling, B., Etzelmüller, 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
- Oerlemans, J. (2001). Glaciers and Climate Change.
- Orlovsky, N. (1994). Climate of Turkmenistan. Biogeography and Ecology of Turkmenistan. *Monographiae Biologicae*, vol. 72. Springer, Dordrecht.
- 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.
- 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.
- 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>
- 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.
- 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>
- Pertziger, F. (1996). Abramov Glacier Data Reference Book: Climate, Runoff, Mass Balance. Tashkent: Central Asian Hydrometeorological Institute.
- Peters, J., Bolch, T., Gafurov, A., and Prechtel, 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.
- Petrov, M. (1976). Deserts of the World. New York: John Wiley & Sons.
- 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.
- 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.
- 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
- 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>
- 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
- Radchenko, I., Dernedde, 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.
- 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.

- 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>
- 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>
- Reyer, C. P., Otto, I. M., Adams, S., Albrecht, T., Baarsch, F., Cartsburg, 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, 10.1007/s10113-015-0893-z
- 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
- 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>
- 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>
- 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>
- 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
- Sakai, A., & Fujita, K. (2017). Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia. *Scientific reports*, 7(1), 13717.
- 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>
- Salnikov, V., Talanov, Y., Polyakova, S., Assylbekova, A., Kauazov, A., Bultekov, N., Musralinova, G., Kisseybayev, 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>
- 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>
- Sara, J., Proskuryakova, T. (2022). Central Asia: at the confluence of global water action and climate resilience Du-shanbe conference to emphasize role of water in sustainable development — The World Bank Blog. Retrieved from <http://surl.li/nkdk1>
- 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
- 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>
- 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.
- 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.
- 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.
- 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>

- Schöne, T., Zubovich, A., Zech, C., Illigner, J., Sharshebaev, A., Mandychev, D., Shakirov, A. N., Haghghi, 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.
- Schöne, T., Zech, C., Unger-Shayesteh, K., Rudenko, V., Thoss, H., Wetzel, 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.
- 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.
- SDC, 2012, Swiss Cooperation Strategy Central Asia 2012–2015: Federal Department of Foreign Affairs FDFA Swiss Agency for Development and Cooperation SDC Federal Department of Economic Affairs FDEA State Secretariat for Economic Affairs SECO.
- 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.
- Semakova, E., & Semakov, D. (2022). Changes in Glaciers in the Pskem River basin, Uzbekistan: 1942–2020. *International Journal of Geoinformatics*, 18(1), 43–51.
- 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.
- Serquet, G., Marty, C., and Rebetez, M. (2013). Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snow-fall/precipitation day ratio: Theoretical and Applied Climatology, v. 114, pp. 437–444.
- 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.
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- Siegfried, T., Bernauer, T., Guiennet, 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.
- 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. 10.3112/erdkunde.2015.01.05.
- 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>
- Sommer, R., Glazirina, M., Yuldashev, T., Otarov, A., Ibraeva, M., Martynova, L., Bekenov, M., Kholov, B., Ibragimov, N., Kobilov, R., Karaev, S., Sultonov, 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.
- 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

- 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.
- Sorg, A., Kääb, 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
- Stanchin, I., Lerman, Z. (2007). Water in Turkmenistan (No. 888-2016-65088).
- 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.
- Strelletschi, 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
- Toderich, K., Tsukatani, T., Abbdusamatov, M. (2004). Water resources assessment, irrigation and agricultural developments in Tajikistan. *KIER Discussion Paper*, 585.
- Tomaszewska M. A., Henebry G. M. (2018). Changing snow seasonality in the highlands of Kyrgyzstan. *Environmental Research Letters*. – T. 13. – №. 6. – C. 065006.
- UNDP. (2011). The glaciers of Central Asia: a disappearing resource: United Nations Development Programme, UNEP/DEWA/GRID-Europe
- 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.2013.02.000>
- Varis, O. (2014). Resources: Curb vast water use in Central Asia. *Nature* 514, 27–29.
- 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.
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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

- Winsvold, S. H., Kääb, 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>
- 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.
- 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.
- 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>
- 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.
- Young, S. S. (2023). Global and Regional Snow Cover Decline: 2000–2022. *Climate*, 11(8), 162; <https://doi.org/10.3390/cli11080162>
- 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>
- 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).
- 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
- Zhang, T. P. (1987). Precipitation in Xirjian Beijing. Beijing Press, 400 pp. (in Chinese).
- 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>
- 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>
- 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
- 8-е национальное сообщение и 5-й двухгодичный доклад Республики Казахстан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. (2022).
- Абдырасурова Н. А., Подрезов О. А., Павлова, И. А., Стрижанцева О. М., Сулейманова Д. К. (2011). Изменение климата Кыргызстана. Кыргызстан: Унисон.
- 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
- Аубекеров Б., Чалихжан Е. и Закупова С. (1989). Изменения климата и палеогеографических условий Центрального Казахстана в позднеледниковые и голоцене. Палеоклиматы позднеледниковых и голоцена. Москва: Наука, с. 98-102.
- 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.
- Бюллетень «Основные показатели работы транспорта Республики Казахстан». (2023).
- Варущенко С., Варущенко А. и Клиге Р. (1987). Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоёмов в палеовремени. Москва: Наука.

- Величко А., Климанов В. и Беляев А. (1987). Каспий и Волга 5,5 и 125 тысяч лет назад. // Природа, № 3, с. 60–66.
- Вилесов Е. Н. (2007). Изменение климата высокогорья Илейского Алатау в условиях глобального потепления. // Гидрометеорология и экология, № 1, с. 29–38.
- Вилесов Е. Н. (2016). Динамика и современное состояние оледенения гор Казахстана. Алматы: Қазақ университеті.
- Вилесов Е. Н., Федулов И. Я. (1968). Ледник Корженевского в Заилийском Алатау. // Гидрологический режим ледников Казахстана, вып. 7, с. 95–103.
- Вилесов Е. Н., Уваров В. Н. (1997). Колебания горных ледников как индикатор изменения климата. // Гидрометеорология и экология, № 3, с. 165–175.
- 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>
- 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>
- Виноградов О. Н., Кренке А. Н., Огановский П. Н. (1966). Руководство по составлению каталога ледников СССР. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- 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).
- Глазырин Г. Е., Станишевский А. В., Чертанов С. П., Огудин В. Л. (1988) Народная гляциология Средней Азии.
- 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.
- Глазырин Г. Е. (1985). Распределение и режим горных ледников. Ленинград: Гидрометеоиздат, 180 с.
- 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.
- Горбунов А. П. (1978) Мерзлотные исследования в высокогорных районах. // Арктические и альпийские исследования, вып. 10 № 2, с. 283–294.
- Горбунов А. П. (1979). Каменные глетчеры Заилийского Алатау. // Криогенные явления Казахстана и Средней Азии, с. 5–34.
- Горбунов А. П., Титков С. Н. (1989). Каменные глетчеры гор Средней Азии.
- 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.
- 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.
- Горбунов А., Немов А. Е. (1978). К исследованию температур рыхлообломочных толщ высокогорного Тянь-Шаня. // Криогенные явления высокогорий. Москва: Наука, с. 92–99.
- Горбунов А., Северский Э., Титков С. (1996). Геокриологические условия Тянь-Шаня и Памира. Якутск: ИМЗ СО РАН, с. 67–83.
- Гулахмадов А. А. (2022). Анализ климатических переменных в верховьях бассейна реки Амудары в Таджикистане. // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, № 1, с 76–85.
- Долгушин Л. Д. и Осипова Г. Б. (1975). Пульсации ледников и проблема их прогнозирования. // Известия АН СССР, № 104, с. 292–304.
- Долуханов П. (1985). Аридная зона Старого Света в позднем плейстоцене и голоцене. // Известия Всесоюзного географического общества, т. 117, с. 16–23.
- 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.

- Духовный В., Соколов В., Зиганшина Д. (2014). Интегрированное управление водными ресурсами в Центральной Азии: Проблемы управления большими трансграничными реками. Global Water Partnership (GWP).
- Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана, 2021. (2022). Республикаское государственное предприятие «Казгидромет».
- Ермолин Е. Д., Немов А. Е., Попов М. В. (1989). Мерзлотно-геотермическая характеристика золоторудного месторождения Кумтор.
- 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>
- 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.
- Золотокрылин А. (2003). Климатическое опустынивание. Москва: Наука.
- Идрисов Т. (2023) Изменение климата и водные ресурсы в Центральной Азии: растущая неопределенность. Центральноазиатское бюро аналитической журналистики. <https://cabar.asia/ru/izmenenie-klimata-i-vodnye-resursy-v-tsentralnoj-azii-rastushchaya-neopredelyonnost>
- Канаев Л. А. (1966). Современное оледенение бассейна на р. Пскем. // Труды САРНИГМИ, вып. 27 (42), с. 35–46.
- Карандаева Л. М. (2004). Оценка современного оледенения бассейна реки Пскем по данным ASTER TERRA. // Труды НИГМИ, вып. 3, с. 96–100.
- Каузов 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>
- 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-математических, химических, геологических и технических наук. № 3 (188), с. 165–173.
- Каюмов А., Кабутов Х. К., Хельцле М., Сакс Т., Барадун М. (2023). Баланс массы ледника Восточный Зульмарт (№ 139) на 2018–2022 гг. // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. № 1 (190), с. 94–102.
- Каюмова А., Новикова В. (2014). Третье национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Душанбе, 167 с., с иллюстрациями и библиографией.
- Кес А., Мамедов Э., Хондкарян 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
- Кислов Б. В. (1982). Формирование и режим фирно-ледяной толщи горного ледника (кандидатская диссертация). САРНИГМИ, Ташкент.
- Кокарев А. Л., Капица В. П., Больх 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>
- Котляков В. М. (1975). Каталог ледников СССР. Гидрометеоиздат, т. 14, вып. 3, часть 17–18, 37 с.
- 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.
- Котляков В. М. (1980). Проблемы и результаты исследований горных ледников в Советском Союзе. // Публикация МАГН, № 126, с. 129–136.

- 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
- 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.
- 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.)
- 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.).
- 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.
- 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.
- Макаревич К. Г., и Федулов И. Я. (1968). Первые сведения о режиме ледника Корженевского. // Гидрологический режим ледников Казахстана, вып. 7, с. 104–115.
- 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.
- 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.
- 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.
- Малышев А. Ф., Осмонбетов К. О., Осмонбетов Е. К. (1997). Состояние и особенности природных и антропогенных источников загрязнения окружающей среды Кыргызстана. // Наука и новые технологии, № 4, Бишкек.
- Маматканов Д., Баджанова Л., Романовский В. (2006). Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Монография, Бишкек.
- Марченко С., Горбунов А. и Романовский В. Е. (2007). Повышение температуры вечной мерзлоты в горах Тянь-Шаня, Средняя Азия. // Глобальные и планетарные изменения, т. 56, с 311–327.
- Марченко С. С. (1999). Современное и ожидаемое в XXI веке изменение мерзлотно-климатических условий в северном Тянь-Шане. // Криосфера Земли, вып. 3, с. 12–21.
- Марченко С. С., Горбунов А. П. (1997). Изменения многолетней мерзлоты в северном Тянь-Шане в течение голоцене. // Вечная мерзлота и перигляциальные процессы, т. 8, № 4, с 427–435.
- 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.
- Министерство энергетики и водных ресурсов Таджикистана. Использование водных ресурсов. Ссылка: https://www.mewr.tj/?page_id=576.

- Мирзохонова С. (2022). Климат Таджикистана в связи с глобальным потеплением. Веб-сайт Таджикского национального университета. Ссылка: <https://tnu.tj/index.php/ru/klimat-tadzhikistana-v-svjazi-s-globalnym-potepleniem/>
- 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.
- Национальная стратегия адаптации к изменению климата Республики Таджикистан на период до 2030 года (2019). Ссылка: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/taj190980.pdf>
- Наврузшоев Х. Д., Каюмов А. К. (2021). Изучение состояния оледенения верховья реки Вуждара дистанционным методом. // Душанбе. Криосфера, т. 1, № 3–4. С. 36–44.
- Неронов В. (1997). Ландшафтные особенности вековых изменений увлажнённости в юго-восточном Туркменистане. // Аридные экосистемы, т. 3 № 6–7, с 141–150.
- 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 гг. // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. № 3 (176), с. 84–91.
- Ниязов Дж. Б., Сайдов М. С., Сайдов С. М. (2018). Лавиноопасность Лахшского района Республики Таджикистан. // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учётом глобального изменения климата «ГЕОРИСК-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.
- Осмонбетова Д. К. (2021). Водные ресурсы и водообеспеченность Кыргызстана. Природобустроство, № 2, с. 117–124.
- 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>
- Пивень Е. Н. (2008). Климат ледниково-нивальной 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.
- Пиманкина Н., Такибаев Ж. (2021). Многолетняя изменчивость снежных ресурсов в Казахстанском Алтае. // Криосфера, 1-2 (1), с. 109–122.
- 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>
- Подрезов О. А. (2014). Горная климатология и высотная климатическая зональность Кыргызстана. Бишкек: Изд-во КРСУ. 170 с.
- 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.
- Профиль изменения климата: Таджикистан (2020). https://www.landuse-ca.org/wp-content/uploads/2019/04/2020_GIZ-Climate-Profile-Tajikistan_RU.pdf
- Рязанцева З. А. (1965). Климат Киргизской ССР. Фрунзе: Илим, 1965. 220 с.
- Савоскул О. С., Шевнина Е. В., Перцигер Ф. И., Василина Л. Ю., Бабурин В. Л., Даньшин А. И., Матякубов Б., Муракаев Р. Р. (2003). Вода, климат, продовольствие и окружающая среда в бассейне реки Сырдарья.
- Сафонова 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- Северский Э. В. (2019). Геотермический мониторинг криолитозоны Северного Тянь-Шаня. // Вопросы географии и геоэкологии, вып. 2, с. 87–96.
- 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.
- Служба водных ресурсов Кыргызской Республики (2022.09.09). Водные ресурсы Кыргызской Республики в объективе НИСИ КР. Ссылка: <http://surl.li/njzif>
- Тарасов П. (1992). Эволюция климата и ландшафтов Северного и Центрального Казахстана. Докторская диссертация, Московский государственный университет, Москва, Россия.
- Тарасов П., Уэбб 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.
- 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.
- 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.
- Токмагамбетов Т. Г. (2010). Оледенение Юго-Восточного Казахстана в условиях изменения климата. КазККА Хабаршысы, № 2, с. 248–254.
- Тологонов Е. (2022). Водные ресурсы и вопросы водопользования государствами Центральной Азии. NISI.kg <https://nisi.kg/blog/23-Vodnyie-riesursy-i-voprosy-vodopolzovaniia-ghosudarstvami-Tsentralnoi-Azii.html>.
- Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Ташкент, 2016.
- Турсунова А., Медеу А., Алимкулов С., Сапарова А., и Баспакова Г. (2022). Водные ресурсы Казахстана в условиях неопределенности. // Водное и земельное хозяйство, вып. 54.
- Тюменев С. Д. (2008). Водные ресурсы и водообеспеченность территории Казахстана. Алматы: КазНТУ.
- 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.
- Усманова З. С., Капица В. П. (2015). Современное оледенение и гляциальные озёра бассейна реки Карагатал. // Вестник КазНУ, Серия географическая, т. 1, № 40, с. 255–262.
- 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].
- 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. Кулебекова З. Е., Асанова Б. Д. Springer Water.
- Федулов И. Я., Шульц А. Г. (1989). Баланс массы ледника Корженевского. // Ледники, снежный покров и лавины горных районов Казахстана, с. 38–47.
- Финаев А. Ф. (2013). Динамика оледенения некоторых районов Памиро-Алая. // Вопросы географии и геоэкологии, № 3, с. 32–42
- 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.
- 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.
- Хакимов П. (2019). Изменение климата в Афганистане, Кыргызстане и Таджикистане: тенденции и адаптационная политика, способствующая инновациям. Доклад № 55.
- 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.
- Царёв, Б. (2006). Оценка влияния изменения климата на максимальное снегонакопление в горах Центральной Азии. Труды НГИМИ, т. 4, № 249, с. 15–32.
- Черкасов П. А. (2004). Расчёт составляющих водно-ледникового баланса внутренне континентальной ледниковой системы (под ред. Северского И. В. и Медеу А. Р.).
- Четвёртое национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата(2022).
- Чуб В. Е. (2007). Изменение климата и его влияние на гидрометеорологические процессы, агроклиматические и водные ресурсы Республики Узбекистан. Ташкент: Ворис нашриёт.
- Шульц В. Л. (1965). Реки Средней Азии. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Щетинников А. С. (1976). Ледники бассейна р. Пскем. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Щетинников А. С., Подкопаева Л. Д. (без даты). Каталог ледников СССР. 1968–1969 гг. Ленинград: Гидрометеоиздат. Т. 14, части 1, 3.
- Эшмент Б. (2011). Распределение водных ресурсов в Центральной Азии. Неразрешимая проблема?