



Водные истории из Туркестана: вызовы и возможности для Бадам-Сайрамской водной системы в условиях изменения климата

Айдар Жумабаев ^a, Ханна Шведхельм ^b, Беатрис Марти ^a,
Сильван Рагеттли ^a, Тобиас Зигфрид ^a

^a hydrosolutions GmbH, ул. Венуштрассе 29, 8050 г. Цюрих, Швейцария

^b Мюнхенский технический университет, ул. Арчиштрассе 21, 80333 г. Мюнхен, Германия

Данная версия является переводом статьи «Water Tales from Turkistan: Challenges and Opportunities for the Badam-Sayram Water System under a Changing Climate», опубликованной в журнале 7 августа 2024 г.

АННОТАЦИЯ

Река Бадам, приток реки Арыс в бассейне Сырдарьи, является важным природным ресурсом для экологической, социально-экономической деятельности в полусухом регионе Южного Казахстана. Бассейн реки в значительной степени зависит от антропогенной водной инфраструктуры и сталкивается с дефицитом воды, особенно в летний период, что подчеркивает важность понимания его гидрологических процессов для эффективного управления водными ресурсами. В рамках данного исследования была реализована полураспределенная концептуальная гидрологическая модель р. Бадам с использованием гидрологического программного обеспечения RS MINERVE для оценки воздействия изменения климата на гидрологию и проверки устойчивости водной системы. Связанные модели HBV были реализованы для каждой из единиц гидрологической реакции (hydrological response units), определенной как высотная зона. Гидрологическая модель была откалибрована с использованием ежедневных временных интервалов в период с 1979 по 2011 г., и полученные кривые превышения стока и гидрографы применялись для оценки потенциального воздействия изменения климата на бассейн с использованием сценариев осадков и температуры CMIP6. Будущие климатические сценарии на период 2054-2064 гг. демонстрируют, что пик стока будет смещен на весну / позднюю весну по сравнению с текущим началом лета без значительного уменьшения среднесуточного стока в течение года. Полученные из этой гидролого-гидравлической модели данные могут быть использованы для эффективного управления водной системой, обоснования будущих решений по гидроэнергетическим проектам, а также могут служить моделью для подобных исследований в регионе и за его пределами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

изменение климата, гидрологическое моделирование, водные ресурсы, водная система Бадам-Сайрам, анализ гидрологических сценариев, поддержка принятия решений

Для корреспонденции: Тобиас Зигфрид ✉ siegfried@hydrosolutions.ch hydrosolutions GmbH, ул. Венуштрассе 29, 8050 г. Цюрих, Швейцария

1. Введение

1.1. Общие сведения

В полупустынной зоне Центральной Азии нехватка воды является постоянной проблемой, вызывающей регулярные конфликты по поводу распределения водных ресурсов (Bernauer & Siegfried, 2012). Бассейн р. Бадам расположен в этой гидроклиматологической зоне и р. Бадам впадает через Арыс в Сырдарью (FAO, 2012). Это важный природный ресурс, который поддерживает экологическую, социальную и экономическую деятельность на юге Туркестанской области Казахстана (см. карту на Рисунке 1). Подземные воды используются для обеспечения питьевой водой (Tleuova et al., 2023).

Река берет начало в Угамском горном хребте, расположенном на границе Казахстана и Узбекистана. Средняя высота бассейна составляет 965 м над уровнем моря. Максимальная и минимальная высоты — 4203 и 252 м над уровнем моря соответственно. В сравнении с другими бассейнами в зоне формирования стока Центральной Азии, это очень низкорасположенный водосбор (Marti et al., 2023).

Длина реки составляет около 141 км. Основные притоки — Сайрам, Улучур и Тогуз. Источниками воды для реки являются родники, подземные воды, талые воды снега и льда. Большая часть русла реки проходит по гравийному дну, что приводит к значительным потерям воды через фильтрацию в подземные воды (Sasrugaeva et al., 2019). Прежде чем впасть в р. Арыс как левый приток, р. Бадам протекает через третий по величине город Казахстана — Шымкент. Площадь водосборного бассейна Бадама составляет примерно 4224 км².

Во времена Советского Союза были построены два водохранилища и несколько каналов, включая межбассейновую передачу воды из р. Сайрам в р. Бадам. Водоохранилище Бадам было спроектировано с активной емкостью 59 млн м³ (Scientific-Information Center of the Interstate Commission for Water Coordination of Central Asia (SIC ICWC), n. d.) для орошения вниз по течению. Гораздо меньшее по размеру водохранилище Тогуз имеет активную емкость 4,6 млн м³. Оно питается за счет межбассейнового водопереноса и было построено для обеспечения водой в промышленных целях вблизи г. Шымкент. В связи с существенными антропогенными изменениями в стоке в настоящее время адекватно говорить о всей водной системе Бадам-Сайрам. Эта система обсуждается в разделе 1.2 ниже, а схематическая диаграмма показана на Рисунке 2.

С продолжающимся ростом населения в бассейне роль орошения становится менее значимой, и роль водохранилищ в системе меняется. Например, водохранилище Бадам все больше рассматривается как место для рекреационных целей. Инвесторы признают возможность использования гидроэнергетического потенциала для третьего по величине города Казахстана

как потенциально прибыльный будущий бизнес. С учетом более привлекательных тарифов на выкуп электроэнергии инвесторы все больше интересуются развитием малых гидроэлектростанций (МГЭС). Общий акцент делается на использовании гидроэнергетического потенциала рек и ирригационных каналов для улучшения местного и регионального водо- и энергоснабжения с учетом геополитического, экологического и технологического контекста стран Центральной Азии и растущего внимания к переходу к зеленой экономике (Azimov & Avezova, 2022).

Высокий спрос на водные ресурсы в сельскохозяйственном, бытовом и промышленном секторах ставит Казахстан в число стран с высоким водным стрессом (Luo et al., 2013). Ожидается, что в течение XXI века уровень дефицита воды возрастет (Didovets et al., 2021). Следовательно, хорошее понимание гидрологических процессов в бассейне и того, как они изменяются в условиях меняющегося климата, является необходимым для эффективного управления и планирования водных ресурсов, а также для поддержки развития надежных гидроэнергетических проектов. Представленное здесь исследование воздействия климата способствует решению этой задачи.

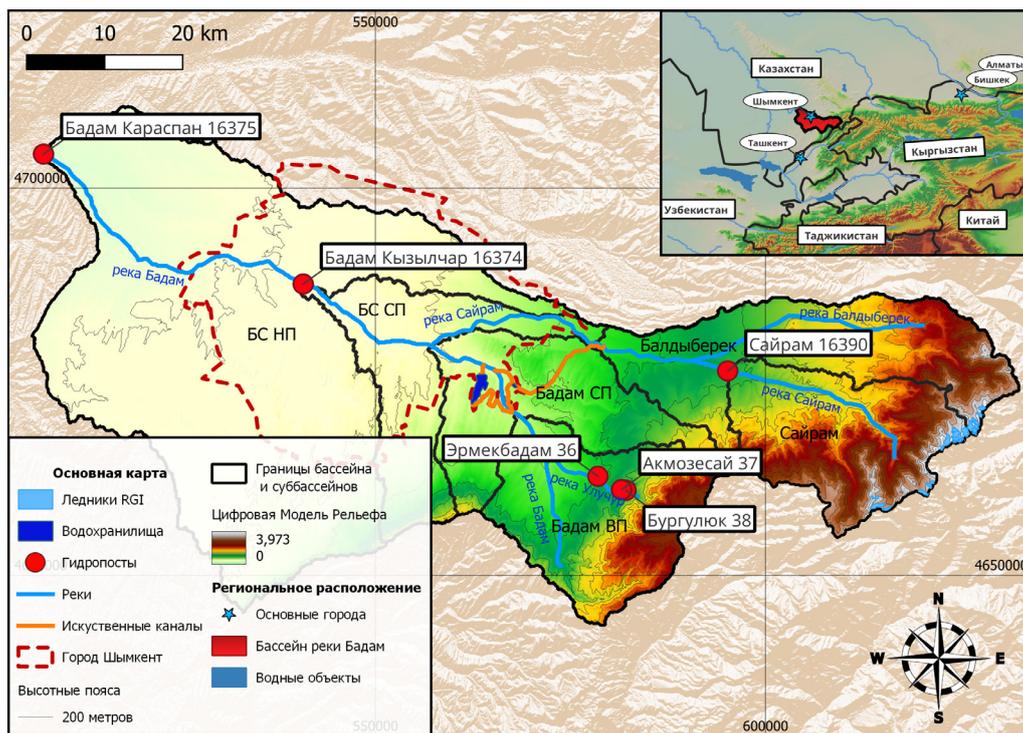


Рисунок 1. Карта показывает район исследования. Основная карта отображает цифровую модель рельефа (ЦМР, SRTM (NASA JPL, 2013)). Сеть рек показана линиями светло-голубого цвета, искусственная система отводных каналов изображена оранжевыми линиями, а водохранилища – темно-синим цветом. Контуры ледников обозначены ярко-голубым. Пунктирная линия указывает приблизительную границу г. Шымкент по состоянию на 2023 г.

Красные точки обозначают гидропосты, для которых доступны исторические данные о стоке. Вставка (справа сверху) показывает региональное расположение. Черные сплошные линии обозначают границы бассейна и суббассейнов с названиями суббассейнов, написанными черным текстом. Тонкие черные линии – это высотные пояса с шагом 200 м. Числа рядом с названиями станций – индексы станций (КазГидромет [KazHydromet], 2006). Фоновая карта – это слой теневого рельефа ESRI. Карта выполнена в QGIS (QGIS Association, 2022) с координатами в UTM 42N (EPSG: 32642).

1.2. Водная система Бадам-Сайрам

Настоящее исследование фокусируется на существующей водной системе Бадам-Сайрам (ВСБС), включающей несколько водозаборных сооружений и каналов, а также водохранилища Тогуз и Бадам. На Рисунке 2 представлена схема системы с долгосрочным средним водным балансом (выделено зеленым цветом). Потоки в водозаборных сооружениях отражают текущие условия эксплуатации и могут измениться при различных сценариях в будущем.

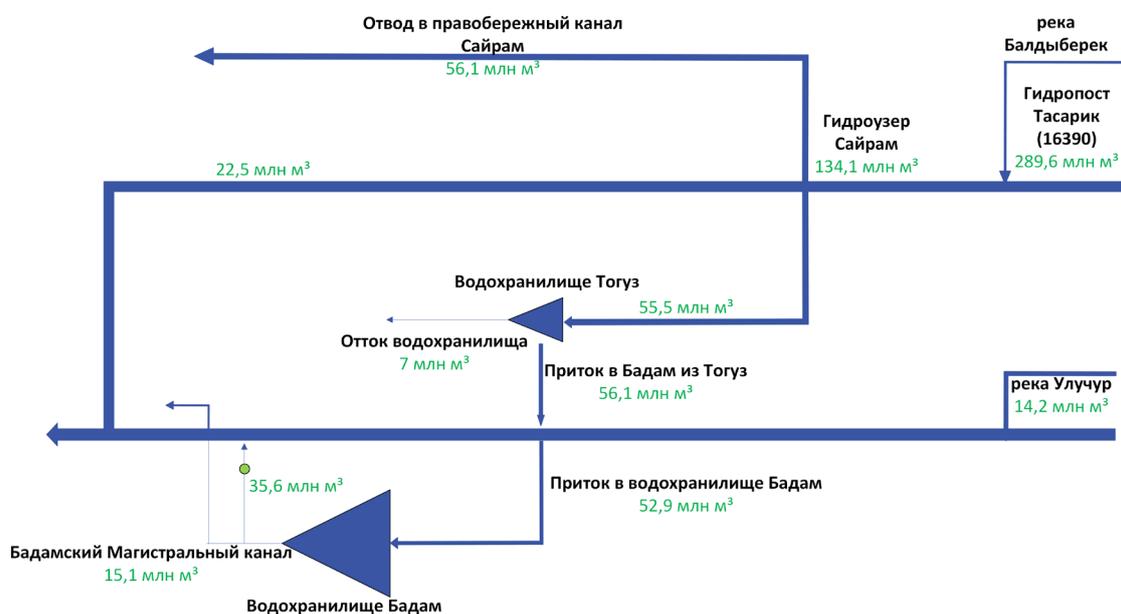


Рисунок 2. Схема ВСБС показана вместе с долгосрочным водным балансом. Данные приведены в миллионах кубических метров (млн м³). Расход воды в верхнем течении р. Бадам не измеряется (см. также карту на Рисунке 1). БМК – это Бадамский магистральный канал. Данные были собраны из различных источников, включая Казводхоз и Казахскую национальную метеорологическую и гидрологическую службу (см. также Таблицу 2 ниже). Зеленая точка указывает местоположение планируемого малого гидроэнергетического проекта.

Водный баланс, показанный на Рисунке 2, является долгосрочным водным балансом. Он демонстрирует, как вода из двух основных притоков, то есть р. Сайрам и р. Бадам, распределяется между различными каналами и структурами. Данные о стоке из верховий р. Бадам отсутствуют (указано «нет данных»). Это объясняет разницу в оценке стока $> 8,8$ млн м^3 ниже гидроузла Бадам, поскольку любой неучтенный вклад из верховий р. Бадам должен быть добавлен сюда.

Между гидропостом Тасарик (16390) и притоком к Сайрамскому гидроузлу теряется более половины располагаемого расхода (в среднем около $5 \text{ м}^3/\text{с}$). Часть этого количества отводится в правый отводной канал, данные по которому отсутствуют (не показаны на схеме). Высока вероятность того, что основная часть этого недостающего стока пополняет подземные воды вдоль 16-километрового русла с крупногалечным дном.

На р. Сайрам отводное сооружение на Сайрамском гидроузле направляет воду в правобережный канал, используемый главным образом для орошения, и в левобережный канал. В среднем 42 % доступной воды отводится в правобережный отводной канал. Левобережный канал передает воду (в среднем 41% доступной воды) к водохранилищу Тогуз и р. Бадам. Водоохранилище Тогуз обеспечивает водой нижележащие промышленные предприятия. Отводное сооружение на р. Бадам направляет воду из р. Бадам и дополнительную воду из Сайрам-Тогузского водохранилища в Бадамское водохранилище ($52,9$ млн м^3). Сток Тогузского водохранилища объемом 7 млн м^3 включает в себя воду, используемую для промышленных и ирригационных целей вдоль левобережного отвода Сайрам и ниже водохранилища Тогуз.

Вода, накопленная и выпускаемая из Бадамского водохранилища, частично используется для орошения сельскохозяйственных и несельскохозяйственных земель рядом с городом или в его черте. Разница между притоком и оттоком Бадамского водохранилища ($2,2$ млн м^3) объясняется потерями от испарения с открытой водной поверхности и просачиванием в подземные воды.

При сбросе воды из водохранилища Бадам, часть отводится в нижестоящий Бадамский магистральный канал (БМК). Оставшийся отток Бадамского водохранилища возвращается в естественное русло реки, где он также частично используется для ирригационных целей ниже по течению как часть системы р. Арыс. Вода для гидроэнергетического использования ниже по течению от Бадамского водохранилища состоит из воды рр. Бадам и Сайрам, направленной через Тогузское водохранилище. Местоположение планируемой гидроэлектростанции обозначено зеленой точкой на Рисунке 2.

Усредненный многолетний водный баланс, показанный на Рисунке 2, также предполагает наличие экологического стока для экосистем ниже по течению от гидроузлов Сайрам и Бадам. Однако следует подчеркнуть, что эти годовые усреднения могут скрыть месяцы возможного дефицита воды, когда расход ниже гидроузлов значительно уменьшается или даже прекращается полностью.

В связи с запланированным строительством гидроэнергетической инфраструктуры ожидается, что система в ближайшем будущем претерпит изменения, которые, вероятно, отразятся в новом режиме эксплуатации с целью максимизации выработки гидроэнергии. Представленное здесь исследование влияния климата поможет ответить на вопрос об устойчивости системы. Оно также поставит текущие и планируемые на будущее правила эксплуатации в контекст изменяющейся доступности воды и позволит обдумать необходимые коррективы.

2. Данные и методы

2.1. Данные

В настоящем исследовании мы используем различные наборы данных для количественной оценки влияния изменения климата на гидрологию ВСБС до середины XXI века. В Таблице 1 представлена сводка использованных данных. На Рисунке 4 показана блок-схема процесса моделирования с выделением соответствующих данных.

Таблица 1. Сводная таблица ключевых данных, использованных для исследования воздействия климата.

Название	Описание	Использование
Расход	Временные ряды ежемесячных расходов с 1979 по 2011 г. по шести гидропостам (см. Таблицу 2). Источник: Казахская национальная метеорологическая и гидрологическая служба (КазГидромет).	Справочные данные для калибровки и проверки гидрологических моделей.
SRTM	Цифровая модель рельефа (ЦМР), разрешение 30 метров, с заполнением впадин (NASA JPL, 2013).	Разграничение водосбора и ручьев, а также определение полос высот.
CHELSA v2.1	Ежедневные временные ряды температуры близкой к поверхности и осадков с разрешением сетки 1 км. (Karger et al., 2020 , 2021).	Данные за период с 1979 по 2011 г. использовались как базовый климат для калибровки модели и служили эталонным периодом при уточнении будущих климатических сценариев.
CMIP6	Сценарии изменения климата, включая SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 (Riahi et al., 2017) для трех приоритетных глобальных климатических моделей, включая GFDL-ESM4 (Krasting et al., 2018), MRI-ESM2-0 (Yukimoto et al., 2019), и UKESM1-0-LL (Tang et al., 2019).	Ежедневные временные ряды температуры и осадков за XXI век, использовались как входные данные гидрологической модели для конкретных климатических сценариев.
RGI v6.0	Контурные линии ледников (RGI Consortium, 2017).	Геопривязанные контурные линии ледников, использованные для расчета масс-баланса ледников в зависимости от климатических сценариев.
Толщина ледников	Набор данных о толщине ледника (Farinotti et al., 2019).	Оценка начальных объемов ледников.

Для калибровки и валидации модели были использованы месячные наблюдения за период с 1979 по 2011 г. Период калибровки охватывал 1980-2000 гг., а период валидации – с 2001 по 2011 г. Все данные о расходе воды с шести гидропостов были предоставлены Казгидрометом, как показано в Таблице 2. В этой таблице показаны также временные рамки наблюдений. Местоположение постов показано на Рисунке 1.

На Рисунке 3 представлены временные ряды данных о расходе воды. В местах, не затронутых деятельностью человека, сезонность характеризуется пиковым стоком в конце весны и начале лета (на Рисунке А1 в Приложении показан анализ сезонности речного стока). Это типично для ниво-плювиальных речных систем в Центрально-Азиатском регионе (Marti et al., 2023).

В данных гидрологического поста Бадам Кызылчар (16374) заметны значительные пробелы. Временные ряды для Бадам Караспан (16375) показывают существенные изменения, начинающиеся около 1990 г., после чего режим стока становится гораздо более нерегулярным. Данные, измеренные на посту Сайрам Тасарык (16390), демонстрируют аномалию после политических перемен в конце 1991 г. Вероятно, мониторинг был нарушен в год после распада Советского Союза, что объясняет аномальные записи данных. Данные по р. Улучур доступны только за период с 1979 по конец 1991 г. После этого мониторинг в этом водосборе был прекращен. Это не позволило использовать эти данные для калибровки расхода (подробную информацию о доступности высокоразрешенных климатических данных см. ниже).

Таблица 2. Список гидропостов. Гидрометрические посты отсортированы по возрастанию их кодов. См. также Рисунок 3. Местоположения станций показаны на Рисунке 1. Источник: КазГидромет.

Название гидропоста	Индекс гидропоста	Река	Норма расхода в течение периода наблюдения	Период наблюдения
Эрмекбадам	36	Улучур	0.5 м ³ /с, 15.5 млн м ³	янв. 1979 - дек. 1990
Акмозесай	37	Улучур	0.4 м ³ /с, 12.8 млн м ³	янв. 1979 - дек. 1990
Бургулюк	38	Улучур	0.5 м ³ /с, 14.2 млн м ³	янв. 1979 - дек. 1990
Кызылчар	16374	Бадам	5.9 м ³ /с, 186.6 млн м ³	янв. 1980 - дек. 2020
Караспан	16375	Бадам	9.4 м ³ /с, 294.9 млн м ³	янв. 1980 - дек. 2020
Тасарык	16390	Сайрам	9.2 м ³ /с, 289.6 млн м ³	янв. 1980 - дек. 2020

Сравнение сезонности на р. Улучур (гидропост Бургулюк) и р. Сайрам (гидропост Тасарык, 16390) показывает влияние средней высоты водосбора на пики стока (см. Рисунок А1 в Приложении). Пик стока в бассейне Сайрама происходит на месяц позже, в июне, по сравнению с пиком стока в Улучуре, который обычно наблюдается в мае. Временные ряды расхода воды из Эрмекбадама демонстрируют значительное антропогенное влияние (верхние правые графики на Рисунке 3). На основании имеющейся у авторов информации неясно, как объяснить это измененное течение, которое даже не показывает явной сезонности.

Необходимо подчеркнуть сложное взаимодействие между поверхностными и подземными водами в бассейне. Во время полевой поездки авторы могли наблюдать места, где инфильтрация в подземные воды и эксфильтрация из них происходили рядом друг с другом. Это двустороннее взаимодействие между рекой, ее гравийным руслом и подземными водами подчеркивает динамическую способность реки накапливать и терять воду, делая ее важным компонентом гидрологического цикла водосбора.

Поскольку записи были полноценными с гидрологических постов Бадам Караспан (16375) и Сайрам Тасарык (16390), эти данные были использованы для калибровки гидрологической модели (см. главу 2.2.3).

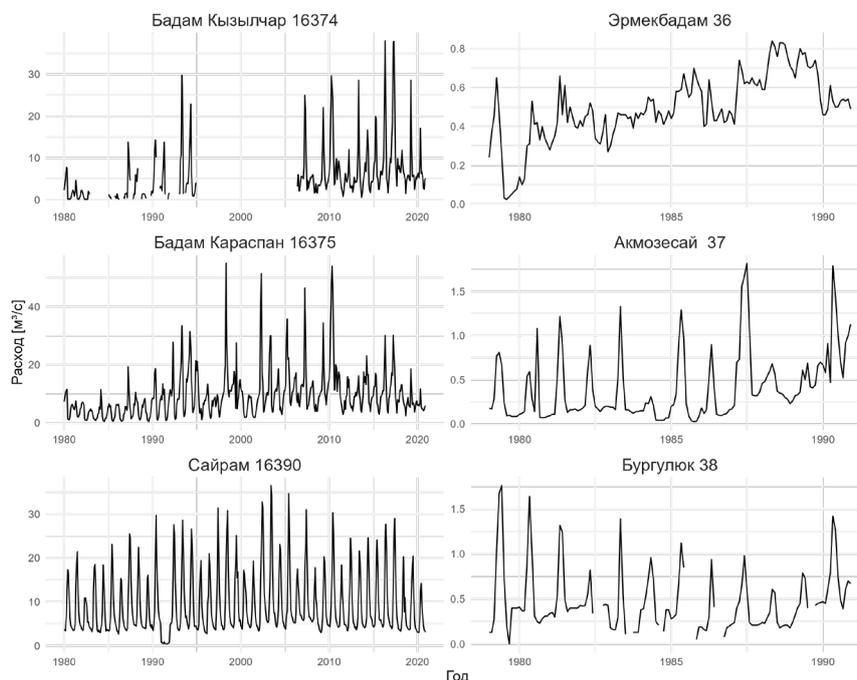


Рисунок 3. Среднемесячные временные ряды расхода воды для шести гидрологических станций, по которым были доступны данные: Бадам Кызылчар, Бадам Караспан, Сайрам за период 1980-2011 гг. и Эрмекбадам, Акмозесай, Бургулюк за 1979-1990 гг. См. также Рисунок 1 для расположения постов. Рисунок А1 в Приложении показывает анализ сезонности данных гидропостов.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) была получена в рамках миссии Shuttle Radar Topography Mission (NASA JPL, 2013). Мы использовали ЦМР с пространственным разрешением 30 м (1 угловая секунда) для определения границ бассейна и выделения суббассейнов. Последние включают три верхних водосбора: бассейны рр. Балдыберек, Сайрам и Бадам (расположенные с севера на юг, см. Рисунок 1). В бассейне р. Бадам перед входом в водохранилище на месте Бадамских гидротехнических сооружений (см. Рисунок 2) был введен искусственный гидрост. Еще три суббассейна были определены ниже по течению: один между Бадам Караспан и Бадам Кызылчар, второй между Кызылчар и слиянием рр. Сайрам и Бадам и, наконец, участок между этим слиянием и Бадамским водохранилищем. ЦМР использовалась для выделения высотных поясов с вертикальным шагом 200 м внутри этих суббассейнов.

Для каждого высотного пояса были рассчитаны однородные временные ряды околоповерхностной температуры и осадков на основе ежедневных климатических данных высокого разрешения CHELSA v2.1 (Karger et al., 2020, 2021). Климатология CHELSA v2.1 представляет собой глобальные ежедневные климатические данные с высоким разрешением 30 угловых секунд для поверхностей суши (Karger et al., 2020, 2021).

Глобальные продукты значительно различаются в способности адекватно отражать локальную климатологию осадков (см., например, Реña-Guerrero et al., 2022). CHELSA v2.1 основана на ERA5, которая, по нашему мнению, хорошо работает в области ВСБС. Последняя представляет собой систему низких и средних высот с четырьмя метеорологическими станциями из Глобальной исторической климатической сети, расположенными внутри или рядом с ВСБС. Эти станции охватывают весь диапазон высот и таким образом способствуют уменьшению неопределенности в наборе данных реанализа. Индексы станций: KZ000038328, UZM00038462, UZM00038339, KZ000038337 и KZ000038334 (Национальные центры экологической информации).

Преимущество климатологических данных высокого разрешения CHELSA v2.1 для околоповерхностного слоя заключается в том, что они позволяют проводить детальный анализ климатических условий на уровне суббассейнов и высотных поясов. Кроме того, эти данные можно рассматривать как наблюдения и, таким образом, использовать для детализации выходных данных глобальных циркуляционных моделей при изучении влияния климата. В этом смысле такие данные особенно полезны в условиях нехватки данных, таких как по Центральной Азии.

Что касается будущего климата, мы получили ежедневные прогнозы осадков и температуры в XXI веке в рамках проекта CMIP6, организованного Службой Copernicus по изменению климата (см. <https://climate.copernicus.eu>).

Эти прогнозы основаны на трех различных моделях: UKESM1.0-LL, MRI-ESM2-0, и GFDL-ESM4. Выбор глобальных климатических моделей (ГКМ) осуществлялся в соответствии со стандартами проекта ISIMIP (Проекта межсекторального сравнения моделей воздействия). Подробную информацию о методологии можно найти на веб-сайте ISIMIP (Lange, 2021).

Наше исследование сосредоточено на четырех комбинированных социально-экономических и климатических сценариях: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5. Эти сценарии охватывают потенциальные будущие условия, основанные на различных предположениях о выбросах парниковых газов и социально-экономическом развитии. Мы использовали ежедневные климатические данные из этих моделей для расчета среднесуточных температур и осадков по высотным полосам, характерным для конкретных суббассейнов. Это включало в себя сравнение исторических данных с 1979 по 2011 г. и коррекцию смещений с помощью пакета qmap в R для обеспечения точности (Gudmundsson et al., 2012; R Core Team, 2022).

Геопривязанные контуры ледников были предоставлены Реестром ледников Рэндольфа (RGI Consortium, 2017). Большинство контуров ледников в наборе данных версии V6 получены на основе спутниковых снимков (см. Рисунок 1). Мы использовали эти данные вместе с информацией о толщине ледникового льда (Farinotti et al., 2019) для определения начальных объемов ледников и извлечения исторических (1979-2011) и будущих климатических воздействий на ледяные участки. Это позволило изучить влияние климата на наземный лед и стоки в исследуемом бассейне (см. главу 2.2.1 ниже).

2.2. Методы

2.2.1. Гидрологическая модель

Гидрологические модели являются ценными инструментами для оценки водного баланса бассейна реки и прогнозирования его реакции на различные гидроклиматические сценарии. В последние годы гидрологические модели становятся все более сложными, интегрируя различные источники данных, передовые алгоритмы и методы машинного обучения для повышения их точности и надежности. В нашем исследовании мы используем гидрологический подход моделирования, адаптированный к региону Центральной Азии, который доказал свою применимость в местных условиях и показал хорошие результаты в различных исследованиях (Siegfried & Marti, 2022). Рисунок 4 представляет рабочий процесс гидрологической модели, в центре которого находятся гидрологическая и гидравлическая модель.

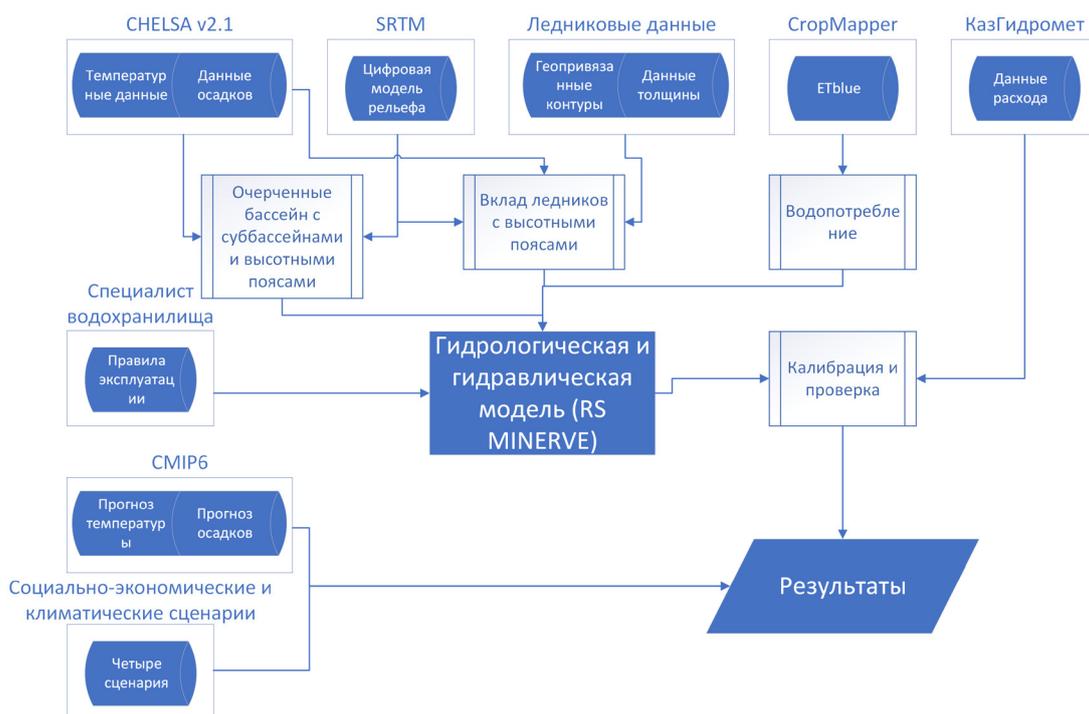


Рисунок 4. Блок-схема структуры моделирования. Схема обеспечивает визуальное представление рабочего процесса данного исследования.

Полураспределенная концептуальная модель была реализована с использованием бесплатной среды гидрологического моделирования RS MINERVE (Foehn et al., 2020; Garcia Hernandez et al., 2020) для изучения воздействия климата на ВСБС. RS MINERVE – это программное обеспечение для гидрологического моделирования, разработанное CREALP (Исследовательским центром альпийской окружающей среды) в сотрудничестве с Федеральным технологическим институтом Швейцарии в Лозанне, Политехническим университетом Валенсии и компанией Hydro10 (RS Minerve, 2021). Это программное обеспечение предназначено для поддержки анализа и управления водными ресурсами посредством комплексных возможностей моделирования. Оно использует гидрологические и гидравлические модели, которые могут быть взаимосвязаны и применены к водосборным бассейнам, рекам и системам водохранилищ для изучения динамики водотоков. Кроме того, RS MINERVE предоставляет удобный интерфейс (см. Рисунок A2) и графические инструменты для моделирования, что облегчает визуализацию и интерпретацию гидрологических данных и результатов моделирования. В данном исследовании RS MINERVE используется для реализации полураспределенной концептуальной модели с суббассейнами и высотными поясами.

Речной бассейн был разделен на шесть суббассейнов с соответствующими высотными поясами для адекватного отражения динамики таяния и накопления снега, зависящей от высоты, на субгодовых масштабах. Для каждого высотного пояса в каждом суббассейне были реализованы отдельные модели HBV (Bergström, 1976). Модель HBV состоит из снежного покрова, резервуара содержания воды, резервуара влажности почвы, а также верхних и нижних резервуаров хранения почвы. В рамках этой структуры каждая модель настраивается с 15 калибруемыми параметрами, которые контролируют различные процессы. Площадь суббассейна, являясь фиксированным географическим атрибутом, не подвергалась калибровке, так как служит статическим параметром внутри модели. Этот параметр площади суббассейна обеспечивает точное представление физических характеристик суббассейна, одновременно позволяя тонко настраивать динамические гидрологические процессы во время калибровки. Таким образом, в общей сложности было создано и взаимосвязано 57 моделей HBV (см. Рисунок A2 в приложении).

Зональность модели была введена для избежания чрезмерной параметризации, и были определены три зоны в соответствии с верхним, средним или нижним высотным поясом или местоположением модели HBV. Зональность была обусловлена характеристиками суббассейна, определенными подлежащей геологией: плутонические породы доминируют в верховьях, а в среднем и нижнем течении ВСБС преобладают смешанные осадочные породы и несцементированные отложения (Hartmann & Moosdorf, 2012). Параметры моделей HBV, сгруппированные в одной зоне, имеют одинаковые значения. Калиброванные окончательные значения параметров приведены в Приложении в Таблице A1. Процесс калибровки и валидации модели описан в разделе 2.2.3, а результаты представлены в разделе 3.

Модели HBV моделируют жидкую воду и твердую воду, хранящуюся в виде снега. Вклады ледников в сток необходимо было реализовать вне компонентов модели HBV и добавить отдельно в качестве источников к стоку каждого суббассейна, где присутствуют ледники. С этой целью мы создали ежедневную модель баланса массы для каждого ледника р. Бадам. Потеря массы ледника моделируется на отдельных диапазонах высот с интервалом 100 м с использованием воздействия температуры и осадков из набора данных CHELSA v2.1. Таяние ледников было реализовано с помощью модели таяния ледников по градус-дням (Hock, 2003), которая была откалибрована на основе смоделированных скоростей абляции ледников, полученных в исследованиях Miles et al. (2021) и Hugonnet et al. (2021).

Масштабирование площади и объема ледников по Эрасову (Erasov, 1986) было выполнено с использованием площадей и объемов ледников, полученных

из набора данных RGI, а также оценок толщины ледников по Farinotti et al. (2019). Вклад ледников в расход воды были рассчитан в R и добавлен в RS MINERVE в качестве источников для каждого бассейна с наличием ледников, а именно для рр. Балдыберека и Сайрам. Будущая динамика наземного льда была рассчитана аналогичным образом с использованием скорректированных по смещению ежедневных температурных и осадочных данных, специфичных для глобальных циркуляционных моделей (ГЦМ) и климатических сценариев, определяющих будущие компоненты масс-баланса.

2.2.2. Моделирование гидротехнических сооружений и водопотребление

Элементы инфраструктуры в ВСБС были реализованы с использованием соответствующих элементов гидравлической модели в RS MINERVE. Обзор этих элементов см. в статье Garcia Hernandez et al. (2020). Мы различаем искусственную инфраструктуру водозабора и хранения, с одной стороны, и места потребления воды, с другой.

Два водохранилища в бассейне были реализованы как объекты водохранилищ RS MINERVE. Каждое водохранилище имеет связанную зависимость уровня от расхода (объект HQ). Объекты HQ для расхода водохранилищ были внедрены, поскольку правила эксплуатации водохранилищ были недоступны. Это позволило нам смоделировать средний режим эксплуатации без точных знаний правил эксплуатации.

Вместе с объектами кинематических волн были выбраны объекты эффективности сооружений для учета отвода воды в каналах к водохранилищам и из них. Значения были определены на основе местных отзывов (личное общение с А. Уразкелдиевым). Конструктивные особенности водохранилищ и каналов были получены из личного общения с сотрудниками гидротехнических сооружений Бадам во время полевого визита в октябре 2021 г. и последующих бесед.

Мы использовали метод неконтролируемой классификации для картирования орошаемых земель в ВСБС (Ragettli et al., 2018). Для детализированного картирования культур использовалось бесплатное приложение CropMapper (Silvan Ragettli, 2022). В общей сложности было картировано 294 км² орошаемых земель, что составляет примерно 7 % общей площади бассейна. Были выделены четыре доминирующих класса культур, и для каждого класса культур и каждого суббассейна была рассчитана годовая испаряемость от орошения воды (ET_{blue}) для каждой площади культуры. Различные типы культур используются для оценки средней компоненты ET_{blue} по всей области. Для каждого класса культур с помощью CropMapper были определены следующие значения: хлопок – 391 мм на площадь, озимая пшеница – 292 мм на площадь, рис – 686 мм на площадь

и неизвестные культуры – 489 мм на площадь. Класс «неизвестные культуры» включает все классы, которые не удалось дополнительно определить. В Таблице 3 приведено суммарное среднегодовое водопотребление для соответствующих площадей культур.

Таблица 3. Среднегодовое водопотребление для орошения в суббассейнах ВСБС. Все значения указаны в миллионах кубических метров (млн м³), что эквивалентно гигалитрам (Гл). БС СП – средний поток реки Бадам-Сайрам, а БС НП – нижний поток реки Бадам-Сайрам. Бадам ВП и Бадам СП – соответствующие участки р. Бадам до ее слияния с р. Сайрам (см. Рисунок 1). Столбец «Итог» показывает сумму по всем суббассейнам.

Вид культур	Итог	Балдыберек	Сайрам	Бадам ВП	Бадам СП	БС СП	БС НП
Хлопок	6.2	0.1	0.6	1.7	0.8	0.3	2.6
Озимая пшеница	18.5	0.7	1.5	10.1	4.7	0.1	1.2
Рис	17.7	1.0	4.5	3.6	3.4	1.6	3.7
Неизвестно	20.7	1.5	5.6	4.0	3.7	1.8	4.1
В итоге	63.1	3.3	12.3	19.4	12.7	3.8	11.6

Для каждого суббассейна мы реализовали объект потребления RS MINERVE (см. также Рисунок А2 в приложении). Мы смоделировали сезонный спрос на орошение воды, равномерно распределив общий спрос для каждого суббассейна, как показано в Таблице 3, на протяжении сезона орошения, то есть с апреля по конец сентября. В холодный сезон мы предполагаем, что спрос объекта потребления равен 0. Для будущих климатических сценариев мы предположили, что общий сезонный спрос на воду останется неизменным на протяжении XXI века. Это суждение основано на том, что увеличение атмосферного спроса на воду вследствие повышения поверхностных температур и связанного с этим увеличения ET_{blue} будет компенсировано сокращением площади орошаемых земель из-за продолжающейся урбанизации.

2.2.3. Калибровка и проверка модели

Гидрологическая модель была запущена с ежедневными временными шагами для моделирования исторического и будущего стока, зависящего от климатических сценариев. Снимок экрана гидрологической, гидравлической модели приведен в приложении на Рисунке А2. Для калибровки параметров с 1979 по 2000 г. и валидации с 2001 по 2011 г. использовались два гидропоста: Сайрам Тасарик (16390) и Бадам Караспан (16375). Для калибровки был

использован встроенный алгоритм эволюции перемешанных комплексов (Shuffled Complex Evolution Algorithm, SCE-UA). Алгоритм SCE-UA представляет собой глобальную оптимизационную технику, которая сочетает детерминированные и стохастические процессы для эффективного исследования и использования многомерных поисковых пространств, улучшая производительность калибровки модели за счет эволюции популяции решений через конкурентную эволюцию и систематическое рекомбинирование (Duan et al., 1992). Результаты обсуждаются в разделе 3.

3. Результаты

Результаты калибровки представлены на Рисунке 5. Коэффициент эффективности модели по Нэшу-Сатклиффу (NSE) составляет 0,3831 для периода валидации на гидрографе Бадам Караспан (16375) и 0,4511 на гидрографе Сайрам (16390). Коэффициент NSE является статистическим инструментом, используемым для оценки прогностической способности гидрологических моделей (Nash & Sutcliffe, 1970). NSE количественно оценивает, насколько хорошо соответствуют друг другу наблюдаемые и смоделированные данные. Значения NSE варьируются от минус бесконечности до 1. NSE, равный 1, указывает на идеальное совпадение между смоделированными данными и наблюдениями, представляя собой идеальную модель. Когда NSE меньше 0, наблюдаемое среднее значение стока превосходит результаты модели.

Как показано на Рисунке 5, модель хорошо воспроизводит сезонность стока и межгодовую изменчивость. Учитывая сложность ВСБС, мы считаем, что эффективность модели является удовлетворительной. Модель теперь готова к использованию в оценке влияния климата.

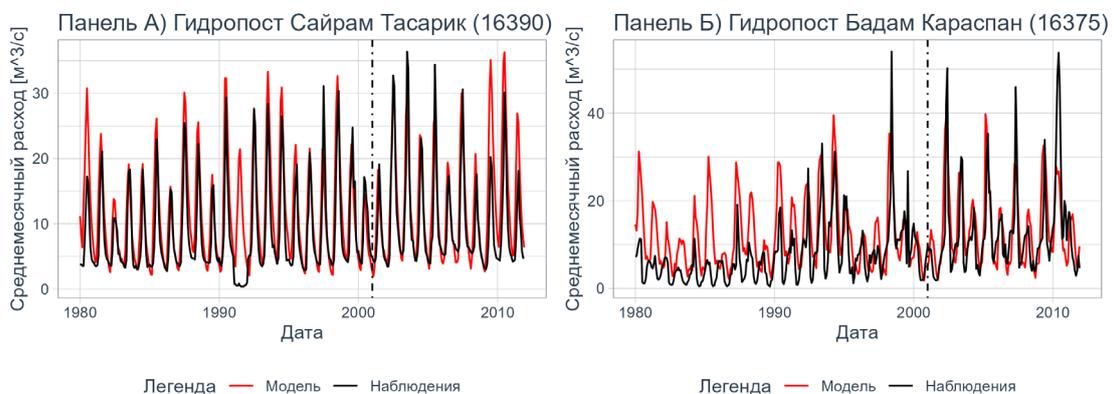


Рисунок 5. Сравнение наблюдаемых среднемесячных данных о расходе (черный цвет) с результатами моделирования (красный) для гидропоста Сайрам 16390 (панель А) и гидропоста Бадам Караспан 16375 (панель Б). Пунктирные вертикальные линии обозначают разделители между наборами калибровки и проверки.

На двух панелях на Рисунке 6 показаны кривые продолжительности стока для рр. Сайрам и Бадам выше по течению от водозаборных сооружений непосредственно в соответствующих точках забора воды. Кривые продолжительности стока показывают совокупное количество дней в году, когда расход превышает определенный порог (Bedient et al., 2013). Расход измеряется в кубических метрах в секунду ($\text{м}^3/\text{с}$), а ось X представляет количество дней в году.

На панелях компактно сравниваются текущие климатические расходы с прогнозами при различных климатических сценариях на 2054-2064 гг. Целевой горизонт был выбран так, чтобы охватить типичный срок службы гидроэнергетической установки, например, той, которая изучалась в рамках технико-экономического обоснования Бадамского водохранилища Hydro4U (Schwedhelm, 2023). Пунктирные линии представляют историческое моделирование речного стока за базовый период 1979-2011 гг. в конкретных местах. Они служат основой для сравнения с будущими сценариями. Сплошные линии представляют средний расход по четырем климатическим сценариям (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5).

Кривые в целом следуют аналогичной схеме: расход выше в течение меньшего числа дней и постепенно снижается. На р. Сайрам (Рисунок 6, левая панель) прогнозируемый расход по сценарию SSP3-7.0 меньше исторического расхода в течение значительной части года (зеленая линия), что указывает на возможное снижение водообеспеченности. Другие сценарии на р. Сайрам показывают примерно такие же расходы в течение большинства дней по сравнению с историческими моделями. Кривые р. Бадам во всех будущих сценариях, похоже, следуют очень близкой схеме с минимальными различиями между сценариями, за исключением SSP5-8.5, в котором расход воды больше, чем в нынешнем климате. Эти результаты позволяют предположить, что влияние различных климатических сценариев на средний расход воды в бассейне может быть относительно умеренным в течение изучаемого временного горизонта. Этот вывод подтверждается региональными исследованиями воздействия климата (см., например, Siegfried et al., 2023).

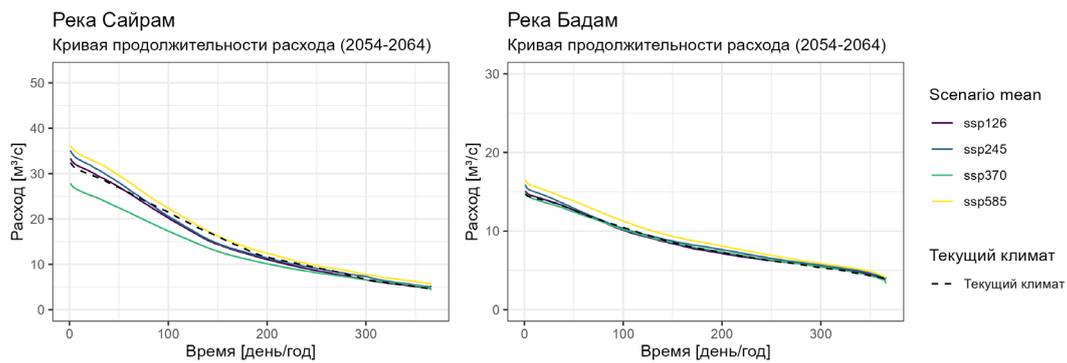


Рисунок 6. Смоделированные кривые превышения для р. Сайрам вверх по течению от отвода в водохранилище Тогуз (левая панель) и р. Бадам вверх по течению от отвода в водохранилище Бадам (правая панель). Кривые рассчитаны для стока реки непосредственно в соответствующих точках водозабора. Пунктирные линии представляют собой кривые превышения для базового периода с 1979 по 2011 г. Кривые, зависящие от климатического сценария, показаны соответственно для периода 2054-2064 гг.

Для изучения влияния изменения климата на расход с точки зрения изменений внутригодового распределения расхода мы исследуем изменения месячных значений расхода на Бадам Кызылчаре. Гидропост находится в центре г. Шымкент и, таким образом, является хорошей точкой для изучения изменения доступности возобновляемых водных ресурсов для ВСБС. Результаты сценария SSP3-7.0 показаны на Рисунке 7 для смоделированного периода 2011-2070 гг. с доступными данными за 60 лет. Результатом являются усредненные по ГКМ-модели месячные значения.

Линии регрессии с положительным наклоном для отдельных месяцев указывают на тенденцию увеличения расходов в рассматриваемом месяце. И наоборот, линии с отрицательным наклоном указывают на тенденцию к снижению. Тенденции значительного увеличения расходов с декабря по май видны там, где моделируется увеличение среднемесячных расходов на + 20 %. Небольшое снижение водообеспеченности наблюдается в июле и августе. Следует отметить, что результаты сопоставимы для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5.



Рисунок 7. Изменения будущих среднемесячных расходов по сценарию SSP3-7.0 на Бадам Кызылчаре. Моделируемый период – 2011-2070 гг. Все ежемесячные данные группируются по соответствующим месяцам (черные линии): Jan = январь, Feb = февраль и так далее. Красные линии показывают простые линии регрессий для каждого месяца отдельно. Синие линии – среднемесячные значения, взятые за весь период.

4. Обсуждение

Гидрологическое моделирование ВСБС, проведенное в данном исследовании, дает ценную информацию о динамике воды в бассейне, имеющем решающее значение для экологической, социальной и экономической структуры Туркестанского региона на юге Казахстана. Внедренная полураспределенная концептуальная модель осадков и стоков позволила провести подробный анализ реакции бассейна на климатические переменные, продемонстрировав сложное взаимодействие между природными процессами и антропогенными факторами. Также важно поддерживать решения в контексте все более взаимосвязанного мира и учитывать взаимосвязь между водой, энергией, продовольствием и климатом (De Keyser et al., 2023).

Данные наблюдений подчеркивают сезонную изменчивость стока, при этом пиковые расходы приходятся на весенние и ранние летние месяцы. Такая закономерность характерна для всех гидропостов и свидетельствует о значительном влиянии таяния снегов и весенних дождей на процессы формирования стока. Перспективный аспект этого исследования, использующий

будущие климатические сценарии, дает представление о потенциальном воздействии изменения климата на гидрологию ВСБС. Как показано в модели, сдвиг пикового расхода вызывает обеспокоенность по поводу сроков и доступности водных ресурсов во внутригодовых временных масштабах, особенно в летние месяцы с высоким спросом (см. Рисунок 7). Этот временной сдвиг может привести к несоответствию между спросом и предложением на воду, что будет иметь серьезные последствия для сельского хозяйства, промышленности и бытового водоснабжения. Тем не менее ВСБС можно считать климатически устойчивым, поскольку в бассейне имеется активное хранилище, которым можно управлять, и поскольку мы не ожидаем увидеть снижение доступности воды в течение изучаемого временного горизонта. Водохранилища в ВСБС могут помочь решить проблему сезонности изменения за счет изменений в управлении запасами существующих или будущих водохранилищ.

Существует явная необходимость в непрерывном мониторинге гидрологии бассейна для валидации и улучшения модели. Интеграция новых наборов данных, таких как спутниковые снимки высокого разрешения и данные мониторинга, может значительно повысить прогностические возможности модели. Ежедневные оценки водности снега, предоставляемые продуктом Реанализ снега в высокогорных районах Азии (High Mountain Asia Snow Reanalysis) с разрешением сетки 500 м, могут улучшить калибровку модели для решения проблемы нехватки данных (Liu et al., 2021). Кроме того, исследование социально-экономических последствий изменения доступности воды для местных сообществ может обеспечить более целостное понимание будущего бассейна при различных климатических сценариях.

Влияние человеческой деятельности на гидрологический режим очевидно: эксплуатация водохранилищ и предлагаемые гидроэнергетические проекты указывают на значительный антропогенный след в речном бассейне. Двойное использование водохранилищ для сельского хозяйства и рекреации, а также изученные мероприятия в рамках проекта Hydro4U иллюстрируют сложности управления водными ресурсами в данном регионе.

Хотя подход к моделированию, выбранный для изучения воздействия климата на ВСБС, считается адекватным для этой цели, он имеет ограничения. Одним из таких ограничений является неспособность модели точно воспроизвести динамику фильтрации гравийного русла реки (грунтовых вод), важного компонента гидрологического цикла в этом районе. Этот пробел подчеркивает необходимость дальнейших исследований подповерхностной гидрологии водосбора и потенциал улучшения методов моделирования для лучшего отражения этих процессов. Необходимость в этом еще больше усугубляется тем фактом, что загрязнение подземных вод угрожает снабжению питьевой водой быстрорастущего города

Шымкент и его окрестностей. Уже обнаружены значительные загрязнения нитратами, фосфатами, фосфором, фторидами и свинцом (Tleuova et al., 2023).

Исследование обеспечивает основу для принятия обоснованных решений в управлении ресурсами ВСБС. Это также помогает в правильном проектировании гидроэнергетической инфраструктуры. Поскольку изменение климата продолжает менять гидрологические режимы во всем мире, уроки, полученные здесь, могут послужить основой для аналогичных исследований в полузасушливых регионах по всему миру, подчеркивая решающую роль комплексных исследований гидролого-гидравлического моделирования в устойчивом управлении водными ресурсами.

5. Заключение

В исследовании изучается влияние изменения климата на гидрологию бассейна р. Бадам, важнейшего водного ресурса на юге Казахстана. Вопрос исследования сосредоточен на том, как изменение климата влияет на наличие воды и гидрологические процессы в этом полузасушливом регионе. Для этого мы реализовали полураспределенную концептуальную гидрологическую модель с использованием программного обеспечения RS MINERVE с калибровкой на основе исторических данных с 1979 по 2011 г. и прогнозами на 2054-2064 гг. с использованием климатических сценариев CMIP6.

Результаты показывают, что пиковые расходы сместятся с начала лета на конец весны, но ожидается, что средняя доступность возобновляемых водных ресурсов не изменится кардинально в ВСБС до периода 2054-2064 гг. С этой точки зрения мы считаем, что ВСБС устойчива к изменению климата. Это также означает, что развитие малой гидроэнергетики остается привлекательным вариантом в течение изучаемого периода времени, способствуя тем самым переходу к «зеленой» энергетике в регионе Центральной Азии.

Основным движущим фактором изменений в ВСБС станет социально-экономическое и демографическое развитие в бассейне, при этом увеличение численности населения будет соответствовать или превышать национальные прогнозы ООН по населению для Казахстана (United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division, 2022).

Потребности в воде для рекреационных целей, питьевого водоснабжения и промышленных процессов будут возрастать, оказывая дополнительное давление на экосистемы. Вода для орошения в бассейне, вероятно, будет сокращаться по мере роста г. Шымкент. Наконец, непотребительское использование воды для производства гидроэнергии, скорее всего, усилит взаимосвязь между энергетикой и водными ресурсами. Эти изменения имеют важное значение для

политики и управления системой и могут потребовать модернизации системы для увеличения объемов хранения.

При любых обстоятельствах будущий регуляторный фокус должен сместиться в сторону поддержания и улучшения качества воды, чтобы обеспечить хорошее состояние водных систем и гарантировать, что качество питьевой воды соответствует необходимым стандартам. Это также означает, что необходимо четко признать связь между поверхностными и подземными водами, а также улучшить понимание взаимосвязи этих ресурсов. Это должно включать создание комплексной программы мониторинга поверхностных и подземных вод, включая их количество и качество. Эти новые данные также могут быть использованы для улучшения гидрологических и гидравлических моделей, таких как представленная здесь.

Когда мы смотрим в будущее, то становится очевидным, что интегрированные гидрологические исследования, непрерывный мониторинг и трансграничное сотрудничество станут ключевыми элементами в преодолении неопределенностей меняющегося мира. ВСБС, со своим сложным взаимодействием природных процессов и человеческого воздействия, предлагает конкретный пример исследования, что может послужить основой для подобных гидрологических оценок и стратегий управления водными ресурсами в полувлажных регионах по всему миру.

Финансирование исследования

Данное исследование получило финансирование от программы Европейского союза по исследованиям и инновациям «Горизонт 2020» в рамках грантового соглашения № 101022905.

Благодарности

Мы благодарим Казахскую национальную метеорологическую и гидрологическую службу за предоставление данных о стоке. Кроме того, выражаем благодарность Абдихамиду Уразкельдиеву и Ойтуре Анарбекову, чья помощь и консультации во время полевых работ были неоценимы.

Список литературы

- Azimov, U., & Avezova, N. (2022). Sustainable small-scale hydropower solutions in Central Asian countries for local and cross-border energy/water supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112726. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112726>
- Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2013). *Hydrology and Floodplain Analysis*. Prentice Hall. <https://books.google.ch/books?id=53JBpwAACAAJ>
- Bergström, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments (RHO, *Hydrology and Oceanography*, ISSN 0347-7827 ; 7, p. p.162).
- Bernauer, T., & Siegfried, T. (2012). Climate change and international water conflict in Central Asia. *Journal of Peace Research*, 49(1), 227-239. <https://doi.org/10.1177/0022343311425843>
- De Keyser, J., Hayes, D. S., Marti, B., Siegfried, T., Seliger, C., Schwedhelm, H., Anarbekov, O., Gafurov, Z., López Fernández, R. M., Ramos Diez, I., Alapfy, B., Carey, J., Karimov, B., Karimov, E., Wagner, B., & Habersack, H. (2023). Integrating Open-Source Datasets to Analyze the Transboundary Water-Food-Energy-Climate Nexus in Central Asia. *Water*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/w15193482>
- Didovets, I., Lobanova, A., Krysanova, V., Menz, C., Babagalieva, Z., Nurbatsina, A., Gavrilenko, N., Khamidov, V., Umirbekov, A., Qodirov, S., Muhyew, D., & Hattermann, F. F. (2021). Central Asian rivers under climate change: Impacts assessment in eight representative catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100779. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100779>
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031. <https://doi.org/10.1029/91wr02985>
- Erasov, N. V. (1986). Method for determining of volume of mountain glaciers. *Mater. Glyatsiol.*, 14, 307-308.
- FAO. (2012). AQUASTAT Transboundary River Basin Overview - Aral Sea. *Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO)*.
- Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J. J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., & Pandit, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12(3), 168-173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
- Foehn, A., Garcia Hernandez, J., Roquier, B., Fluixa-Sanmartin, J., Brauchli, T., Paredes Arquiola, J., & De Cesare, G. (2020). *RS MINERVE - User Manual*, V2.15 (ISSN 2673-2653). Ed. CREALP.
- Garcia Hernandez, J., Foehn, A., Fluixa-Sanmartin, J., Roquier, B., Brauchli, T., Paredes Arquiola, J., & G, D. C. (2020). *RS MINERVE - Technical manual*, v2.25 (ISSN 2673-2661). Ed. CREALP.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383-3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>
- Hartmann, J., & Moosdorf, N. (2012). The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(12). <https://doi.org/10.1029/2012GC004370>
- Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 282(1-4), 104-115. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00257-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9)
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F., & Käab, 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>
- Karger, D. N., Schmatz, D. R., Dettling, G., & Zimmermann, N. E. (2020). High-resolution monthly precipitation and temperature time series from 2006 to 2100. *Scientific Data*, 7(1), 248. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00587-y>
- Karger, D. N., Wilson, A. M., Mahony, C., Zimmermann, N. E., & Jetz, W. (2021). Global daily 1 km land surface precipitation based on cloud cover-informed downscaling. *Scientific Data*, 8(1), 307. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01084-6>

- Krasting, J. P., John, J. G., Blanton, C., McHugh, C., Nikonov, S., Radhakrishnan, A., Rand, K., Zadeh, N. T., Balaji, V., Durachta, J., Dupuis, C., Menzel, R., Robinson, T., Underwood, S., Vahlenkamp, H., Dunne, K. A., Gauthier, P. P., Ginoux, P., Griffies, S. M., ... Zhao, M. (2018). *NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 CMIP*. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1407>
- Lange, S. (2021). ISIMIP3b bias adjustment fact sheet. https://www.isimip.org/documents/413/ISIMIP3b_bias_adjustment_fact_sheet_Gnsz7CO.pdf
- Liu, Y., Fang, Y., & Margulis, S. (2021). High Mountain Asia UCLA Daily Snow Reanalysis [dataset]. NASA National Snow and Ice Data Center DAAC. <https://doi.org/10.5067/HNAUGJQXSCVU>
- Luo, T., Young, R., & Paul, R. (2013). Aqueduct country and river basin rankings: A weighted aggregation of spatially distinct hydrological indicators. *Washington, DC: World Resources Institute*. <https://www.wri.org/research/aqueduct-country-and-river-basin-rankings>
- Marti, B., Yakovlev, A., Karger, D. N., Ragetti, S., Zhumabaev, A., Wakil, A. W., & Siegfried, T. (2023). CA-discharge: Geo-Located Discharge Time Series for Mountainous Rivers in Central Asia. *Scientific Data*, 10(1), 579. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02474-8>
- 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), 2868. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23073-4>
- NASA JPL. (2013). NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Peña-Guerrero, M. D., Umirbekov, A., Tarasova, L., & Müller, D. (2022). Comparing the performance of high-resolution global precipitation products across topographic and climatic gradients of Central Asia. *International Journal of Climatology*, 42(11), 5554-5569. <https://doi.org/10.1002/joc.7548>
- QGIS Association. (2022). QGIS Geographic Information System [Computer software]. QGIS.org. <http://www.qgis.org>
- Ragetti, S., Herberz, T., & Siegfried, T. (2018). An Unsupervised Classification Algorithm for Multi-Temporal Irrigated Area Mapping in Central Asia. *Remote Sensing*, 10(11), 1823. <https://doi.org/10.3390/rs10111823>
- RGI Consortium. (2017). Randolph Glacier Inventory - A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0 [dataset]. <https://doi.org/che>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- RS Minerve (2.9.1). (2021). [Computer software]. CREALP. <https://crealp.ch/rs-minerve/>
- Saspugaeva, G. E., Mahambetova, N. M., Ramazanova, N. E., & Tulebekova, A. S. (2019). Экологические проблемы водных ресурсов Южно-Казахстанской области [Ecological problems of water resources of South Kazakhstan region]. Вестник Восточно-Казахстанского Государственного Технического Университета Им. Д. Серикбаева [Bulletin of the East Kazakhstan State Technical University Named after D. Serikbaev], № 2, С. 51-55.
- Schwedhelm, H. (2023). Feasibility Study Badam Reservoir.
- Scientific-Information Center of the Interstate Commission for Water Coordination of Central Asia (SIC ICWC). (n.d.). Portal of Knowledge for Water and Environmental Issues in Central Asia. [www.Cawater-Info.Net](http://www.cawater-info.net/bk/1-1-1-1-3-kz_e.htm). http://www.cawater-info.net/bk/1-1-1-1-3-kz_e.htm
- Siegfried, T., & Marti, B. (2022). Modeling of Hydrological Systems in Semi-Arid Central Asia. *GitHub Pages*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4666499>

- Siegfried, T., Mujahid, A. U. H., Marti, B., Molnar, P., Karger, D. N., & Yakovlev, A. (2023). Unveiling the Future Water Pulse of Central Asia: A Comprehensive 21st Century Hydrological Forecast from Stochastic Water Balance Modeling. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3611140/v1>
- Silvan Ragettli. (2022). Remote Sensing and Geospatial Analysis Applied to Irrigation Performance Assessment, *CropMapper Methodology* (01.03.2022).
- Tang, Y., Rumbold, S., Ellis, R., Kelley, D., Mulcahy, J., Sellar, A., Walton, J., & Jones, C. (2019). MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 CMIP esm-piControl. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5953>
- Tleuova, Z., Snow, D. D., Mukhamedzhanov, M., & Ermenbay, A. (2023). Relation of Hydrogeology and Contaminant Sources to Drinking Water Quality in Southern Kazakhstan. *Water*, 15(24), 4240. <https://doi.org/10.3390/w15244240>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. (2022). World Population Prospects 2022 Demographic indicators by region, subregion and country, annually for 1950-2100 (27). United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Ishii, M., Obata, A., & Adachi, Y. (2019). MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6842>
- КазГидромет [KazHydromet]. (2006). Государственный водный кадастр Республики Казахстан: Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Выпуск 3 [State Water Cadastre of the Republic of Kazakhstan: Long-term data on the regime and resources of land surface waters. Issue 3]. Министерство охраны окружающей среды.

Приложение

В Таблице А1 перечислены зональные параметры для окончательно откалиброванной гидрологической модели.

Таблица А1. Зональные значения параметров моделей HBV. Эти значения применяются в общей сложности к 57 моделям. Площади моделей HBV не указаны, так как они различаются для всех 57 моделей в соответствии с контурами соответствующего высотного пояса.

Параметр	Единица измерения	Зона А	Зона Б	Зона М	Зона Д
CFMax	mm/deg. C/d	3.9760632	3.7921795	6.5241363	4.5214644
CFR	-	0.1697879	0.051356	0.4999447	0.3057517
CWH	-	0.1	0.1194662	0.1199852	0.0809045
TT	deg. C	2.4312328	1.1763552	2.9998382	2.4312328
TTInt	deg. C	2	0.0025191	1.9992994	2
TTSM	deg. C	0	0.5799426	0.9998591	0
Beta	-	2.5	1	4.9978445	2.5
FC	m	0.25	0.0589636	0.65	0.25
PWP	-	0.5	0.9658056	0.0304671	0.0300558
SUMax	M	0.05	0.1	0.0628649	0.001031
Kr	1/d	0.05	0.05	0.2612245	0.0500067
Ku	1/d	0.01	0.01	0.0106188	0.0100046
Kl	1/d	0.0103699	0.0089935	0	0.016505
Kperc	1/d	0.3602316	0.3280102	0.7266497	0.3602316

На Рисунке А1 показана диагностика сезонности имеющихся данных датчиков. Диагностика охватывает период 1979-1991 гг.

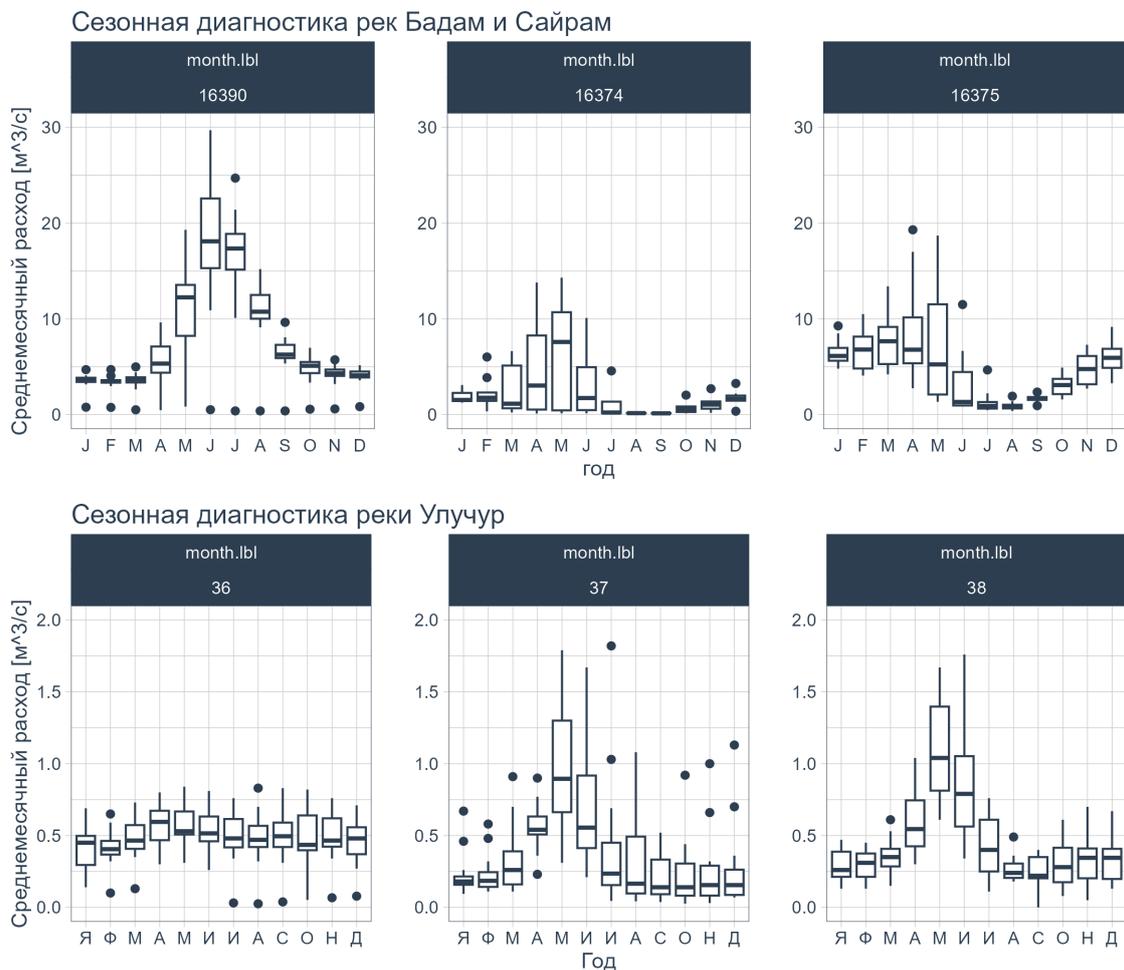


Рисунок А1. Диагностика сезонности речного стока. Сравните с Рисунком 3 и Таблицей 2 описание данных датчика и графиков временных рядов. Пик расхода воды в р. Улучур приходится на май по сравнению с р. Сайрам, которая является водосбором с более высокой средней высотой и, следовательно, достигает максимума только в июне.

На Рисунке A2 показан снимок экрана модели RS MINERVE.

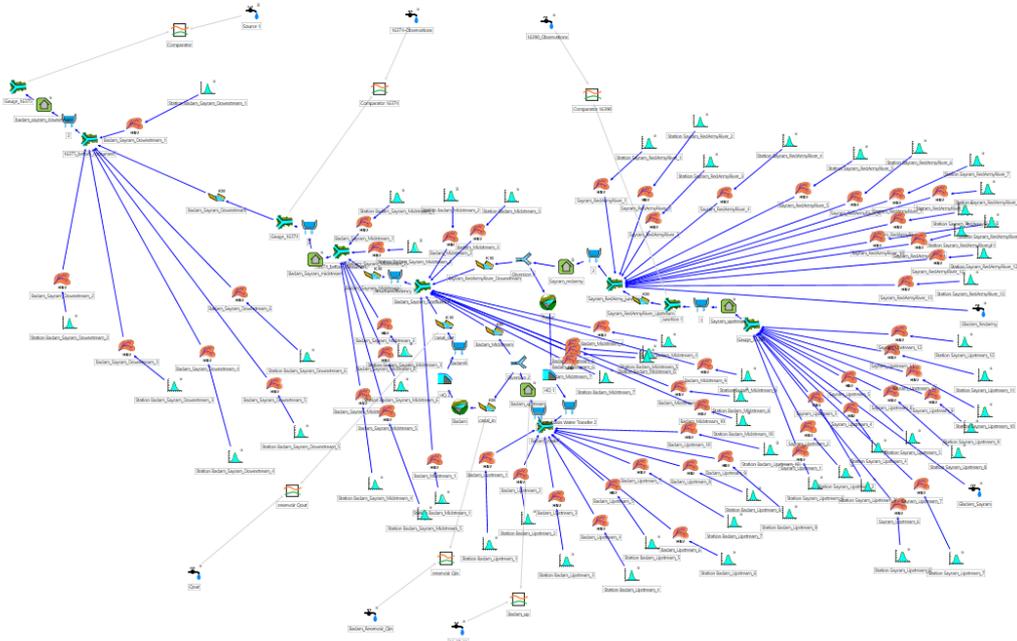


Рисунок A2. Скриншот полураспределенной концептуальной гидрологической модели RS MINERVE Badam. Высотный бассейн и модели HBV, специфичные для суббассейна, обозначены красным цветом. Климатические воздействия, характерные для определенных диапазонов высот, обозначаются виртуальными метеорологическими станциями ярко-синим цветом. Вклад ледников рассчитывается извне и добавляется через исходные условия (источники). Синими стрелками указаны направления движения рек, соединяющие отдельные гидрологические модели и гидрообъекты. Местоположение гидростов указывается объектами сравнения, связанными со структурами, специфичными для местоположения.