

РОССИЙСКИЙ ОТКРЫТЫЙ МОЛОДЕЖНЫЙ ВОДНЫЙ КОНКУРС-2024

*Тема: Гидрогеопространственный анализ и прогнозное моделирование динамики
бассейна реки Амударья в условиях изменения климата*



Российский открытый молодежный водный конкурс с 2003 года

Авторы: *Яран Худайбердиев, Керим Мередов*

Руководитель:

Сулейман Маметмурадов,

Преподаватель кафедры Мелиорации сельского хозяйства

Факультета Гидромелиорации

Туркменского сельскохозяйственного университета имени С.А. Ниязова

Туркменистан, Ашхабад – 2024

Аннотация

Работа посвящена изучению влияния изменения климата на водные ресурсы бассейна реки Амударья в Туркменистане. Данная проблема является актуальной, поскольку изменение климата приводит к повышению температуры воздуха, уменьшению количества осадков и усилению засушливости в регионе. Это, в свою очередь, негативно сказывается на водных ресурсах, что может привести к нехватке воды для сельского хозяйства, промышленности и бытовых нужд. Целью проекта является анализ и прогнозное моделирование динамики бассейна реки Амударья в условиях изменения климата, путём изучения влияния климатических факторов, в том числе осадков, температуры и засушливости, на водные ресурсы бассейна. В рамках проекта были поставлены следующие задачи: 1) оценка текущего состояния водных ресурсов бассейна; 2) анализ тенденций изменения гидрологического режима за последние 50 лет; 3) разработка прогностической модели влияния климатических факторов на сток реки до 2050 года. В результате исследования были выявлены следующие тенденции: Средняя температура в Туркменистане за 1986-2015 годы повысилась на $0,6^{\circ}\text{C}$ по сравнению с 1881-1960 годами. Наибольшее увеличение температуры в последние 30 лет фиксировалось летом - на $1-1,5^{\circ}\text{C}$ в июне-августе, отдельно на $2-2,5^{\circ}\text{C}$. Повышение температуры привело к снижению осадков по всему региону в среднем на 10%. Согласно модели REMO 04/06, к 2050 году среднегодовая температура в Центральной Азии возрастёт на $1,5^{\circ}\text{C}$, осадки изменятся незначительно, но их изменчивость усилится. К 2050 году объём стока Амударьи в отдельные годы может быть ниже среднегодового на 49,89; 53,67 и 50,98 км³. Наибольшее влияние климат окажет на летний сток, в частности, в августе до 0,8 км³, в июне до 1,3 км³, в июле до 2,7 км³.

В рамках проекта были проанализированы метеорологические, гидрологические и спутниковые данные за период 2000-2020 гг. Для моделирования гидрологического режима реки используется инструмент гидрологического моделирования (WEAP), основанный на гидрологических и геопространственных данных с различных спутников. Разработанная авторская гидрологическая модель прогнозного моделирования позволит с годовым разрешением оценить изменение стока реки до 2050 года в зависимости от сценариев изменения климата.

Новизна работы заключается в том, что в ней впервые проведено комплексное исследование влияния изменения климата на водные ресурсы бассейна реки Амударья в Туркменистане. Работа содержит новые данные о тенденциях изменений климата, осадков, температуры и засушливости в регионе, а также новые оценки влияния климатических факторов на водные ресурсы бассейна реки Амударья.

Введение

Река Амударья, протекающая по засушливым ландшафтам региона, долгое время была источником жизненной силы для миллионов людей, поддерживая разнообразные экосистемы и жизненно важную сельскохозяйственную деятельность. Однако этот хрупкий баланс сталкивается с беспрецедентными проблемами в связи с изменением климата. Научное сообщество все чаще признает необходимость всестороннего изучения и понимания сложного взаимодействия между динамикой климата и гидрологическими системами. В этом контексте наше исследование основывается на целостном анализе гидрологических взаимодействий, обусловленных климатом, в регионе Амударьи. Многогранный характер этих взаимодействий требует комплексного подхода, объединяющего информацию о динамике прибрежных районов и водной динамике речных бассейнов. Кроме того, в исследовании используются передовые инструменты, такие как географическая информационная система (ГИС) и гидрологическое моделирование, чтобы повысить точность и масштаб нашего исследования. Интеграция ГИС-технологий позволяет нам пространственно представлять и анализировать сложные характеристики исследуемой территории. Синтезируя идеи из науки о климате, гидрологии и геопространственных технологий, мы стремимся внести свой вклад в развивающуюся совокупность знаний о гидрологических взаимодействиях, обусловленных климатом. В конечном счете, это исследование направлено на разработку гидрологической модели реки Амударьи для обоснования адаптивных стратегий и устойчивого управления водными ресурсами в регионе Амударьи перед лицом меняющегося климата.

Материалы и метод

Оценка изменения климата

Анализ исторических климатических данных

Наше исследование эволюционной динамики климата региона Амударья начинается с тщательного анализа исторических климатических данных за несколько десятилетий. Мы изучаем метеорологические показатели, спутниковые наблюдения и другие архивные источники для выявления тенденций изменения ключевых переменных, таких как температура, осадки, влажность и ветер. Целью является установление закономерностей изменчивости климата и наличия долгосрочных сдвигов.

Использование климатических моделей для будущих прогнозов и оценка воздействия на гидрологические закономерности

В нашем исследовании используются несколько климатических моделей для прогнозирования будущих сценариев изменения климата в бассейне реки Амударья.

Анализ полученных сценариев помогает прогнозировать изменения температур, осадков и экстремальных явлений, определяя уязвимость региона к изменению климата. Суть нашего исследования заключается во всесторонней оценке того, как эти прогнозируемые изменения климата отразятся на гидрологических режимах в регионе Амударьи. Мы фокусируемся на двух ключевых аспектах:

1. Речной сток

- Оценить потенциальные изменения в объеме и сроках речного стока. Это включает анализ того, как измененный характер осадков, изменения в динамике таяния снега и сдвиги температуры влияют на сток реки Амударья.

2. Динамика таяния снега

- Учитывая важность таяния снега в горных районах для стока Амударьи, мы оцениваем, как изменение температуры влияет на характер накопления и таяния снега. Это включает в себя изучение сроков и величины стока от таяния снега с последствиями для наличия воды ниже по течению и динамики экосистем.

Объединяя эти оценки, наше исследование направлено на то, чтобы разгадать сложную взаимосвязь между изменением климата и гидрологическими реакциями в регионе Амударьи. Эти знания формируют основу для последующих этапов исследования, способствуя более глубокому пониманию того, как водные ресурсы региона могут эволюционировать в условиях меняющегося климата.

Интеграция с ГИС

Использование инструментов географической информационной системы (ГИС)

- Инструменты географической информационной системы (ГИС) служат основой нашего пространственного анализа, позволяя нам создавать подробные и динамичные представления региона Амударья. ГИС предоставляет платформу для организации, анализа и визуализации пространственных данных, обеспечивая всестороннее понимание сложных взаимодействий в пределах исследуемой области.

- Инструменты ГИС, такие как EarthExplorer, Google Earth Pro, спутник GPM, NASA Earthdata или HydroSHEDS, используются для создания карт, отражающих географические особенности, границы и пространственные взаимосвязи бассейна Амударьи. Эти карты служат пространственной основой для интеграции различных наборов данных и проведения геопространственного анализа.

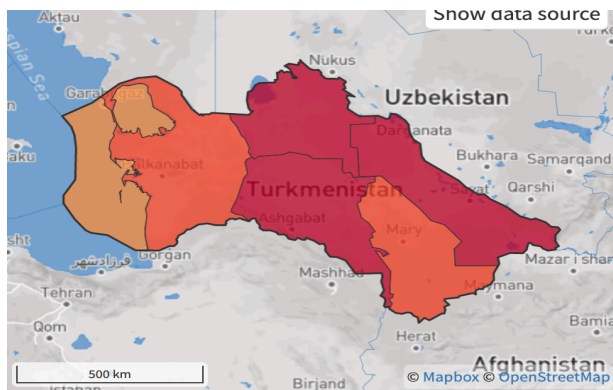
Результаты и обсуждения

Климат Туркменистана отличается крайней континентальностью и суровостью. Северные районы страны, подверженные влиянию Сибирского антициклона, имеют особенно холодные зимы с морозами до -36°C и короткое прохладное лето с малым

количеством осадков. Южные районы, особенно прибрежные, близкие к Каспийскому морю, отличаются более мягкой зимой и жарким летом.

В целом для Туркменистана характерны самые высокие температуры воздуха в Центральной Азии, достигающие $+50^{\circ}\text{C}$ летом, и самый низкий уровень осадков. Анализ данных за 1955-2010 гг. выявил тенденцию потепления климата, сокращения количества осадков и усиления засушливости.

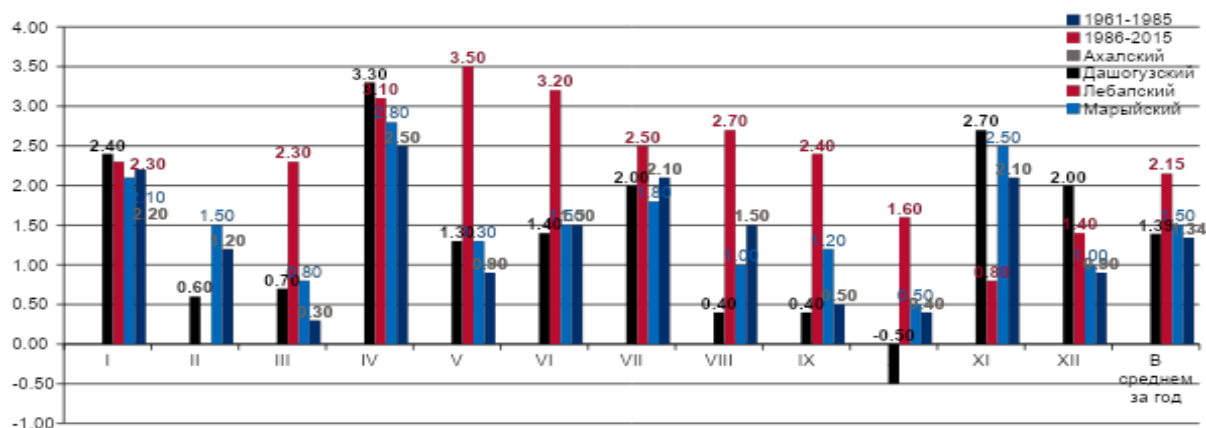
Экстремальные природно-климатические условия страны оказывают негативное воздействие на сельское хозяйство и окружающую среду. Наблюдаемые изменения климата усугубляют эти проблемы, что имеет важные социально-экономические последствия для Туркменистана.



Южная, северная и восточная части Туркменистана окрашены в красный цвет, что указывает на возможность наступления засух примерно каждые 5 лет в данных районах. Западная и юго-восточная части окрашены в оранжевый цвет, что указывает на возможность наступления засух примерно раз в 50 лет в этой зоне. Тем не менее, продолжительные засушливые периоды все еще могут негативно сказываться на сельском хозяйстве и водоснабжении в оранжевой зоне.

Изменение среднегодовой температуры воздуха в Туркменистане за период 1986-2015 гг. по сравнению с 1881-1960 гг. составило $0,6^{\circ}\text{C}$. При этом в Ашхабаде и Мары отмечено повышение температуры на $1,0^{\circ}\text{C}$, в Балкане и Лебапе - на $0,5^{\circ}\text{C}$, в Дашогузе - на $0,3^{\circ}\text{C}$.

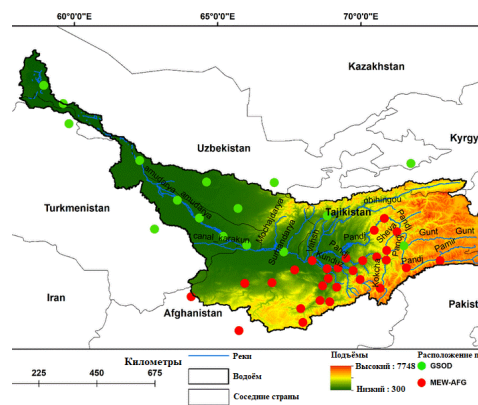
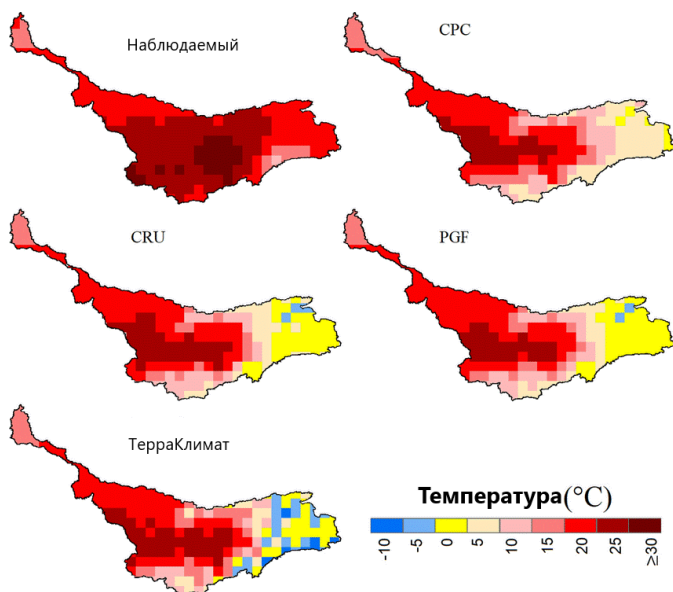
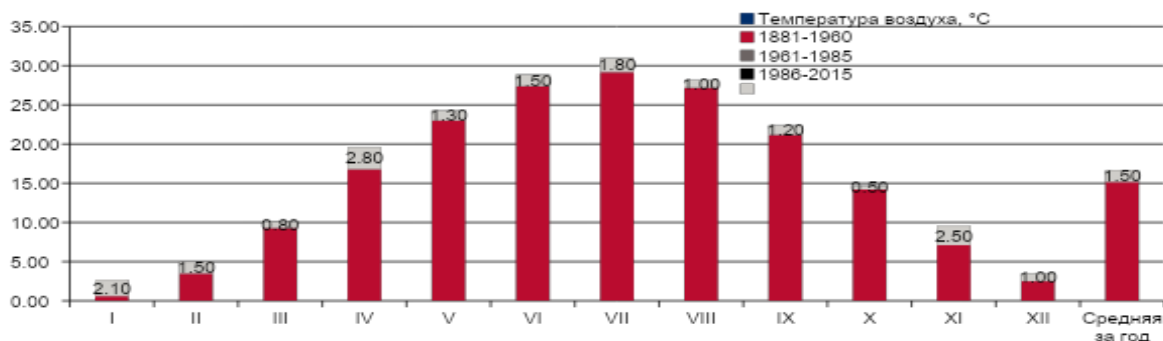
Показатели изменения среднемноголетних значений температуры воздуха в основных регионах Туркменистана за периоды 1986-2015 и 1881-1960 годы



Наибольшее повышение температуры воздуха в Туркменистане за последние 30 лет наблюдалось в летние месяцы. В июне-августе средняя температура воздуха повысилась на 1,0-1,5°C. В отдельные годы повышение температуры воздуха в летние месяцы достигало 2,0-2,5°C.

Повышение температуры воздуха в Туркменистане за последние 30 лет также привело к изменению режима осадков. В Ахале и Мары количество осадков уменьшилось на 10-15%, в Балкане и Лебапе - на 5-10%, в Дашогузе - на 3-5%. Лебапский регион имеет важное значение для Туркменистана, так как именно здесь протекает крупнейшая река страны - Амударья. Особое внимание необходимо уделить влиянию климата на водные ресурсы Амударьи. Высокие летние температуры усиливают испарение воды из русла реки и орошаемых земель. Таким образом, изучение особенностей климата Лебапа, влияния климатических факторов на водные ресурсы имеет важное значение для разработки адаптационных мероприятий.

Изменение значений температуры воздуха Лебапского велаята за периоды 1986 – 2015 и 1881-1960 годы



Бассейн реки Амударья. Климатические данные региона с различных спутников.

Климат региона Амударья

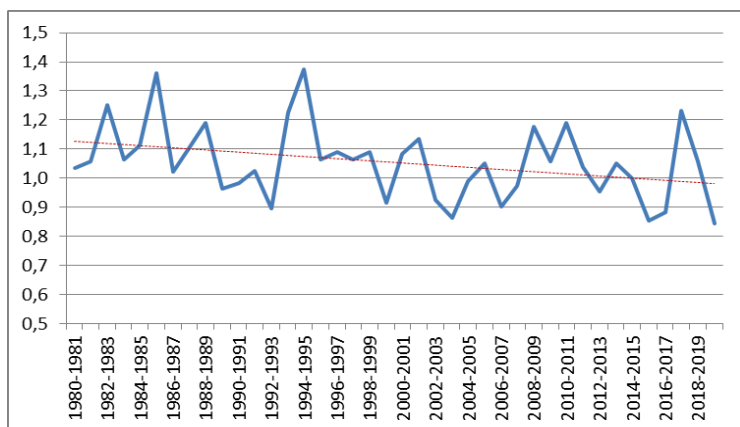
определяется от засушливого до полусушливого, со значительными колебаниями температуры и осадков в зависимости от сезона. Лето часто характеризуется высокими

температурами, в то время как зима может быть суровой и холодной, особенно в высокогорных районах.

Осадков, как правило, выпадает мало, причем большинство приходится на зимние и весенние месяцы. Рельеф региона разнообразен: от пересеченной местности гор Памира и Тянь-Шаня до плоских равнин вдоль берегов рек.

Гидрологические характеристики реки Амударья имеют решающее значение для экосистем региона и деятельности человека. Река служит основным источником пресной воды, поддерживая сельское хозяйство, промышленность и бытовые нужды. На ее сток влияет сезонное таяние снега и ледников на высокогорных хребтах, создавая отчетливую гидрологическую картину. Кроме того, Амударья играет жизненно важную роль в поддержании экологического баланса региона, поддерживая водно-болотные угодья, топи и прибрежные местообитания вдоль своего течения.

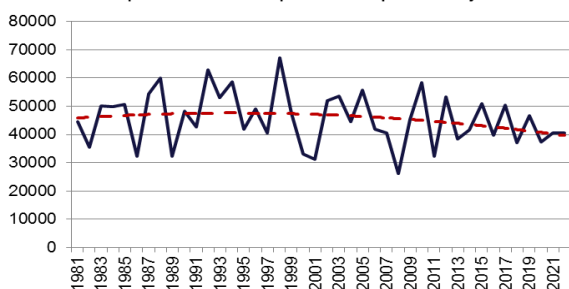
Динамика показателя В.Л.Шульца для р. Амударья - отношения стока реки в июле-сентябре к стоку реки в марте-июне W7-9 / W3-6. Изменение типа питания реки Амударья с ледниково-снегового на снегово-ледникового питания. Доля стока за июнь-август уменьшилась



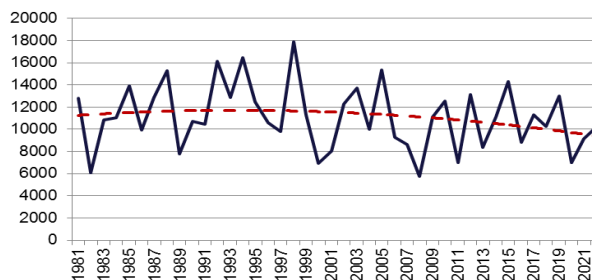
На рубеже 1995-2000 годов наблюдалось увеличение влияния таяния снега и льда на расходы воды реки. Однако в последние годы этот тренд изменился, и наблюдается стабилизация, а затем и уменьшение летних расходов воды. Это связано с

уменьшением площади ледников в бассейне реки Амударья, что произошло на фоне глобального потепления климата, а также с увеличением доли талых вод и уменьшением дождевых вод в стоке реки. В результате этих изменений летний сток реки Амударья сократился, что делает реку менее зависимой от дождевых вод и более зависимой от талых вод в летние месяцы.

Незарегулированный сток р. Амударья за апрель - сентябрь, Келиф, млн.куб.м



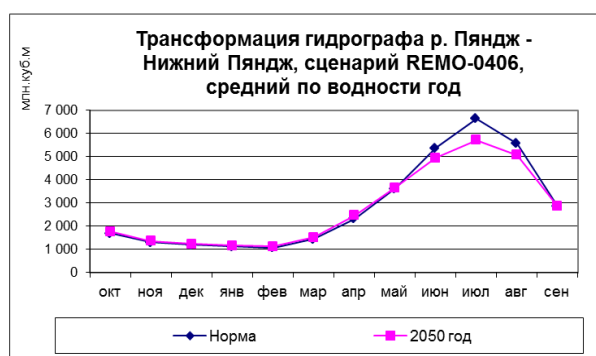
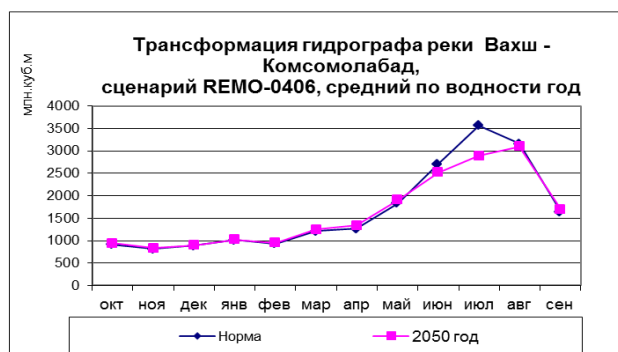
Незарегулированный сток р. Амударья в июле, Келиф, млн.куб.м



Модель REMO 04/06-это региональная модель климата с пространственным разрешением 0.5° (шаг по узлам около 50 км). В данной модели используется сценарий выбросов A1B, предполагающий умеренное и сбалансированное использование ископаемого топлива. Базовая модель - ECHAM 5, разработанная в Германии в European Centre Hamburg general circulation model в Макс-Планк-Институте. Расчет климатических параметров для региона Центральной Азии проводился в Университете Вюрцбурга, Германия. Полученные климатические данные использовались для расчетов гидрографов рек и зон формирования стока на гидрологических моделях с целью определения отклонений расходов воды от нормы к 2050 году.

- Выбранная гидрологическая модель адаптирована к уникальным характеристикам региона Амударьи, включая конкретные исходные данные, связанные с топографией, растительным покровом, типами почв и метеорологическими условиями. Такая интеграция обеспечивает всестороннее представление гидрологической динамики в бассейне реки.

Климатическая модель REMO 04/06 прогнозирует, что с 2020 по 2050 год среднегодовая температура воздуха в Центральной Азии возрастет на 1.5°C . Уровень осадков по этому сценарию изменится незначительно, однако их изменчивость усилится, что приведет к естественным колебаниям между минимальными и максимальными значениями.



Снижения норм средних расходов к 2050 году, в % от нормы (проект PEER)

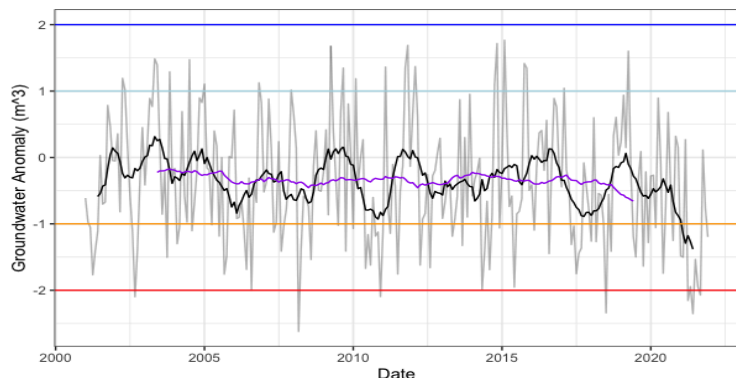
Река, сток	Апрель-сентябрь	Июнь	Июль
Вахш: Комсомолабад	5	5	21
Амударья: Керки	5	8	11
Кафирниган: Тартки	8	17	25
Сурхандарья: Шурчи	6	4	7
Зеравшан: Дупули	11	13	23

Согласно Национальной стратегии Туркменистана по изменению климата (2019), к 2050 году температура воздуха в стране может увеличиться на $1.5-2^\circ\text{C}$ по сравнению с 2020 годом. Кроме того, четвертое национальное сообщение

Республики Таджикистан по рамочной конвенции ООН по изменению климата (2022) указывает, что с 2010 по 2050 год средняя температура воздуха в бассейне реки Пяндж увеличится на 1.5°C . Гидрологическое моделирование является важным инструментом

для изучения и прогнозирования стока рек. Одними из наиболее распространенных моделей гидрологического моделирования являются LARSIM, HBV и WASA.

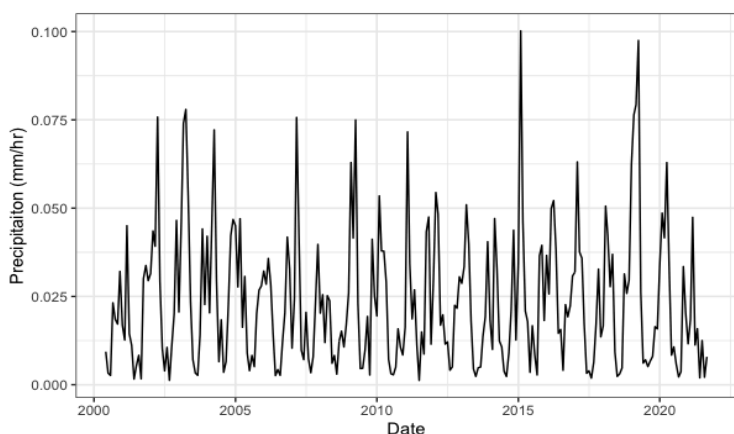
Стандартизированный индекс испарения осадков (SPEI)



SPEI характеризует интенсивность засухи с учетом количества осадков и температуры. Он рассчитывается по формуле, отражающей разницу между осадками и потенциальной эвапотранспирацией.

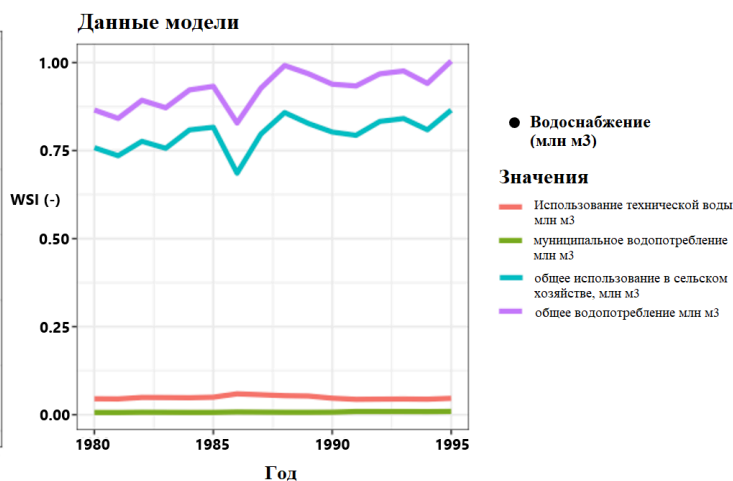
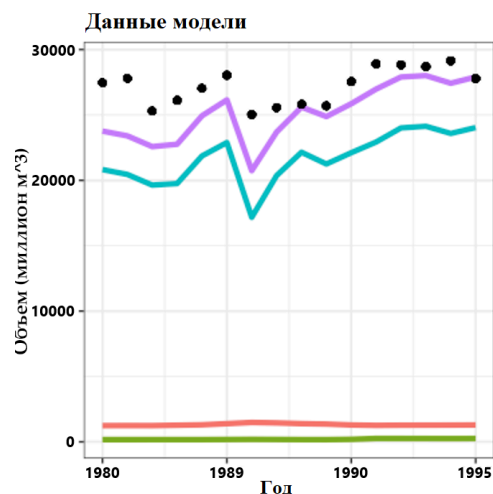
За 20 лет в регионе наблюдались периоды засухи. Самая сильная засуха зафиксирована в 2002 году при значении SPEI ниже -2. За ней последовал влажный период с пиком SPEI 1 в 2005 году. В 2010-2020 годах наблюдалась почти десятилетняя засуха.

Данные о количестве осадков, собранные спутником GPM (Global Precipitation Measurement mission)



Данные представлены в виде временного ряда за 2000-2020 годы. По оси ординат отложены значения интенсивности осадков в мм/ч, по оси абсцисс - время в годах. На графике видно, что в 2000-2005 годах количество осадков было относительно небольшим, в 2006 году оно резко возросло и в 2007 году достигло своего пика. Затем количество осадков стало постепенно снижаться и в 2020 году оно было близко к нулю.

Затем количество осадков стало постепенно снижаться и в 2020 году оно было близко к нулю.



На графике показано, как менялся объем водопотребления в сельском хозяйстве, промышленности и муниципалитетах с 1980 по 1995 год. Видно, что объем водопотребления в сельском хозяйстве был самым большим и составлял около 70% от общего объема водопотребления. Объем водопотребления в промышленности и муниципалитетах был примерно одинаковым и составлял около 15% от общего объема водопотребления. Общий объем водопотребления увеличивался с 1980 по 1995 год.

Также на графике показано, как менялся индекс водного стресса (WSI) с 1980 по 1995 год. Видно, что WSI был самым высоким в 1980 году и составлял около 0,8. Затем WSI снизился и в 1995 году составил около 0,6. Это означает, что в 1980 году дефицит воды был более выражен, чем в 1995 году.

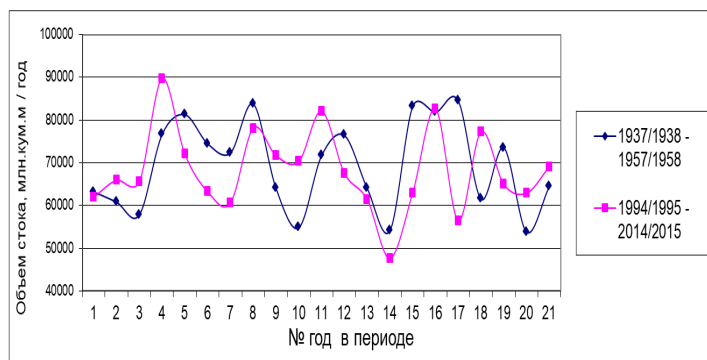
Из графика можно сделать вывод, что сельское хозяйство является основным потребителем воды, и что дефицит воды в 1980 году был более выражен, чем в 1995 году.

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт Туркменистана разработал собственный модельный комплекс для гидрологического моделирования. Этот комплекс использует данные наблюдений для прогнозирования стока рек.

Также один из подходов к гидрологическому моделированию был апробирован Научно-информационным центром в проектах ASBmm и PEER при USAID. Этот подход заключался в моделировании и адаптации управления водными ресурсами трансграничных вод бассейна Амударьи к возможным изменениям климата.

Сравнение данных о стоке реки Амударья за два периода (цикла) показало разницу в объемах стока в несколько миллионов кубических метров воды. Это свидетельствует о значительных колебаниях стока реки в разные годы и циклы, что подтверждает важность гидрологического моделирования для прогнозирования стока и управления водными ресурсами.

Сравнение двух периодов (циклов) стока р.Амударья, (млн.куб.м)



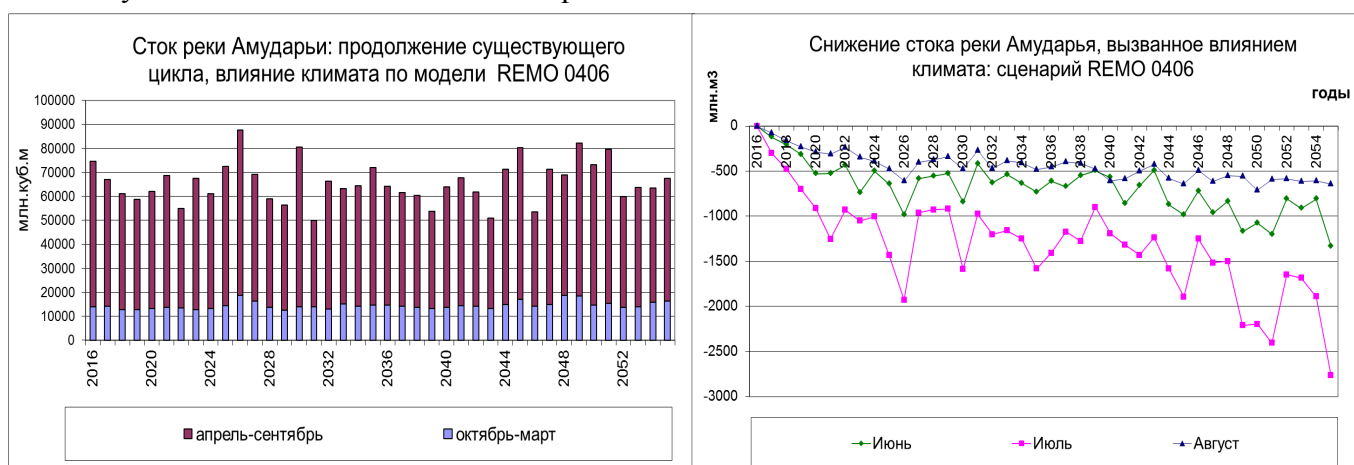
Научно-исследовательский центр мелиорации и водного хозяйства провел расчеты гидрографов стока рек бассейна Амударьи на период до 2050 года в рамках проекта PEER. Результаты

показали, что в ближайшие 30 лет ожидается изменение режима стока в бассейне реки.

Согласно расчетам, объем стока некоторых рек может уменьшиться вследствие изменения климата в регионе. По прогнозам ученых, до 2050 года среднегодовой сток реки Амударьи снизится примерно на 5-10% по сравнению с нынешними показателями. Это может негативно сказаться на водоснабжении сельскохозяйственных угодий и крупных городов бассейна.

Также расчеты показали, что изменится распределение стока по сезонам. Зимний и весенний сток, вероятно, уменьшится, а летне-осенний, наоборот, может возрасти. Это будет связано с ростом температур и учащением засух.

Таким образом, исследование подтверждает негативное влияние изменения климата на водные ресурсы бассейна Амударьи и необходимость разработки адаптационных мер для устойчивого водопользования в регионе.



В период с 2023/2024 по 2049/2050 годы ожидается несколько маловодных лет по бассейну реки Амударья, когда объем стока будет существенно ниже среднегодового значения. Так, в 2031, 2039 и 2043 годах сток составит соответственно 49,89; 53,67 и 50,98 км³. Наибольшее влияние изменение климата будет оказывать на сток в летние месяцы июнь, июль и август. К 2050 году ожидается снижение стока в августе до 0,8 км³, в июне до 1,3 км³, в июле до 2,7 км³. Для особо маловодного 2042-2043 года приведены данные по гидрографу стока реки Амударья выше водозабора в реке Каракум для двух вариантов регулирования стока в Нурекском водохранилище. Таким образом, на основании анализа представленной информации можно сделать вывод, что в период с 2023 по 2050 год ожидается уменьшение среднегодового и летнего стока реки Амударья, что может негативно сказаться на водоснабжении прилегающих регионов. Необходимо заранее разработать меры по оптимальному регулированию стока для смягчения последствий возможных маловодий.

В сообщениях различных организаций приводятся прогнозы изменения стока реки Амударья к 2050 году: По оценке Швейцарского федерального агентства по окружающей среде (FOEN, 2009) сток Амударьи может сократиться на 10 – 15 %.

Согласно отчету Евразийского Банка Развития (2009) на территории Таджикистана ожидается увеличение стока рек бассейна Амударьи на 6 %. Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан по рамочной конвенции ООН по изменению климата (2022) прогнозирует уменьшение стока реки Амударья на 5 – 15 % к 2050 году по сравнению с 2000 годом. Согласно национальному плану действий Республики Таджикистан по смягчению последствий изменения климата (2003) ожидается сдвигка характерных дат половодья на 10 – 25 дней, увеличение продолжительности половодья и уменьшение годового стока рек на 7 – 10 %. Таким образом, прогнозы изменения стока Амударьи варьируются от увеличения на 6% до уменьшения на 15%. Это может негативно сказаться на водоснабжении стран бассейна Амударьи.

Вывод

Исходя из полученных данных и проведённого анализа климатической динамики и гидрологических изменений в бассейне реки Амударья в различные периоды с 1955 по 2050 год, мы приходим к следующим выводам: 1. Тенденция к повышению среднегодовой температуры воздуха в Туркменистане, особенно заметная в летние месяцы, значительно влияет на гидрологический режим реки Амударья. Повышенные температуры способствуют увеличению испарения, что в сочетании с уменьшением уровня осадков усиливает засушливость и негативно сказывается на стоке реки. 2. Прогнозируемое с 2023 по 2050 год снижение среднегодового и летнего стока реки Амударья на 5-10% по сравнению с текущим уровнем подчёркивает необходимость принятия адаптационных мер для обеспечения устойчивости водных ресурсов и пресервации водоснабжения сельскохозяйственных угодий и крупных населённых пунктов. Также, в 2031, 2039 и 2043 годах прогнозируются маловодные периоды со стоком ниже среднегодового. 3. Изменение распределения стока порождает дополнительные риски. Уменьшение зимнего и весеннего стока и потенциальное увеличение стока в летние месяцы вызывают дополнительные проблемы для управления водными ресурсами, особенно в условиях возрастающей частоты засух. Наибольшее влияние изменения климата будет оказываться на сток в летние месяцы июнь, июль и август. Моделирование показало, что ожидается снижение стока в августе до 0,8 км³, в июне до 1,3 км³, в июле до 2,7 км³ к 2050 году. 4. Несмотря на предполагаемое увеличение стока рек в бассейне Амударьи на 6% по одним оценкам, другие источники указывают на сокращение годового стока до 15%, что выявляет разброс прогнозов и подчёркивает сложность адаптации стратегий водопользования. 5. Важность своевременного гидрологического моделирования и прогнозирования стока рек подтверждается наблюдаемыми и ожидаемыми колебаниями, что требует детальной

проработки программ управления водными ресурсами, ориентированных на снижение воздействия маловодных лет и усиления стоков в отдельные периоды. Необходимо оптимизировать регулирование стока Нурекского водохранилища для смягчения последствий возможных маловодий. В период с 2023/2024 по 2049/2050 годы ожидается несколько маловодных лет, когда объем стока будет существенно ниже среднегодового. Сокращение стока реки может негативно сказаться на водоснабжении сельскохозяйственных угодий и крупных городов бассейна Амударьи. 6. Признавая неопределённость климатических прогнозов, следует подчеркнуть важность разработки гибких и адаптивных стратегий водопользования, которые позволят оперативно реагировать на меняющиеся гидрологические условия и обеспечить долгосрочную устойчивость водных ресурсов в регионе.

Бюджет проекта

1. Сбор исходных метеорологических данных - 10500 рублей, при условии использования открытых данных метеостанций.
2. Сбор исходных гидрологических данных - 15000 рублей, за счет открытых данных уровня воды в реках.
3. Сбор исходных спутниковых данных - 23000 рублей (+подписка), надо также учитывать, что некоторые спутниковые изображения и данные доступны бесплатно.
4. Моделирование изменения климата - 12000 рублей (подписка на инструменты гидрологического моделирования)

Список использованной литературы

1. Азиатский Банк развития. Climate risk country profile: Turkmenistan. [Источник](#)
2. Elena Lioubimtseva, Jahan Kariyeva, and Geoffrey M. Henebry. Climate Change in Turkmenistan. [Источник](#)
3. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО. Издание 2019 г.
4. Метеожурнал. Весна в этом году в Туркменистане контрастна. [Источник](#)
5. <http://www.cawater-info.net/amudarya-knowledge-base/index.htm>
6. <https://www.earthdata.nasa.gov/>
7. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
8. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
9. <https://www.hydrosheds.org/products/hydrobasins>