

*главный специалист Регионального информационного центра,
Научно-информационный центр Межгосударственной координационной
водохозяйственной комиссии Центральной Азии (НИЦ МКВК)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕКИ ЧИРЧИК С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СТОКА В ГОДЫ РАЗЛИЧНОЙ ВОДНОСТИ

Аннотация. Настоящее исследование направлено на определение зон формирования стока в бассейне реки Чирчик с использованием геоинформационных систем (ГИС) и спутниковых данных.

Изменение климата и рост водохозяйственной нагрузки усиливают потребность в комплексной оценке речного стока, особенно в горных бассейнах. Бассейн реки Чирчик, расположенный в пределах Западного Тянь-Шаня, представляет собой важный гидрологический узел восточного Узбекистана. Его водный режим формируется под влиянием снегового и ледникового питания, сложного рельефа и антропогенного воздействия.

Цель исследования – определить пространственную структуру зон формирования стока с использованием цифровой модели рельефа, спутниковых климатических данных и методов геоинформационного анализа. Особое внимание уделено орографической классификации, высотной зональности и их связи с распределением водного стока.

Полученные результаты позволяют выделить ключевые зоны генерации стока, уточнить водосборную структуру бассейна и заложить основу для последующих сценарных и прогностических оценок в условиях климатических изменений.

Ключевые слова: река Чирчик; сток; геоинформационные системы; цифровая модель рельефа (DEM); высотная зональность; климатические данные; ледниковое питание; Google Earth Engine.

G. Khamdamova

***Chief Specialist of the Regional Information Center,
Scientific and Information Center of the Interstate Commission
for Water Coordination of Central Asia (SIC ICWC)***

**STUDY OF THE CHIRCHIK RIVER RUNOFF FORMATION ZONE
USING GEOINFORMATION SYSTEMS AND SATELLITE DATA FOR
QUANTITATIVE ASSESSMENT OF RUNOFF IN YEARS
OF DIFFERENT WATER CONTENT**

Abstract. This study aims to identify runoff formation zones in the Chirchik River basin using geographic information systems (GIS) and satellite data.

Climate change and increasing water management load increase the need for a comprehensive assessment of river runoff, especially in mountain basins. The Chirchik River basin, located within the Western Tien Shan, is an important hydrological hub of eastern Uzbekistan. Its water regime is formed under the influence of snow and glacier nutrition, complex relief and anthropogenic impact.

The purpose of the study is to determine the spatial structure of runoff formation zones using a digital elevation model, satellite climate data and geographic information analysis methods. Particular attention is paid to orographic classification, altitudinal zonality and their relationship with water runoff distribution.

The results obtained allow us to identify key runoff generation zones, clarify the catchment structure of the basin and lay the foundation for subsequent scenario and prognostic assessments in the context of climate change.

Key words: Chirchik River; runoff; geographic information systems; digital elevation model (DEM); altitudinal zonation; climate data; glacial feeding; Google Earth Engine.

Введение. В условиях растущего давления на водные ресурсы Центральной Азии, вызванного изменением климата и антропогенными факторами, оценка пространственно-временной изменчивости стока приобретает ключевое значение для устойчивого водопользования. Бассейн реки Чирчик, формирующийся в предгорьях Западного Тянь-Шаня, представляет собой важную часть гидрологической системы региона. В данной работе проводится исследование зоны формирования стока с применением современных геоинформационных систем и методов машинного обучения. Особое внимание уделяется анализу лет с различным уровнем водности, что позволяет выявить ключевые факторы, влияющие на объем стока и структуру его формирования. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности прогноза стока и адаптации к климатическим рискам.

Актуальность проблемы водных ресурсов в условиях изменения климата

В условиях глобального изменения климата наблюдается существенное перераспределение водных ресурсов как во времени, так и в пространстве, что особенно остро проявляется в горных и засушливых регионах. В Центральной Азии водные ресурсы формируются преимущественно за счёт снегового и ледникового питания, что делает регион уязвимым к изменениям температурного режима, характера осадков и деградации ледников. Повышение среднегодовых температур, ранее таяние снежного покрова, уменьшение площадей оледенения, а также учащение экстремальных гидрометеорологических явлений приводят к резким колебаниям объёмов речного стока и дестабилизируют функционирование водохозяйственных систем.

В этом контексте особую научную и практическую значимость приобретает исследование бассейна реки Чирчик, являющейся важным притоком Сырдарьи и ключевым источником водоснабжения восточного Узбекистана. Река Чирчик образуется в результате слияния горных рек Пскем, Угам и Чаткал, берущих начало в пределах Западного Тянь-Шаня. Длина реки составляет около 155 км, а площадь водосборного бассейна – порядка 14 900 км², включая горные зоны формирования стока. На участке выше города Газалкент находится Чарвакское водохранилище, объёмом около 2 км³, играющее ключевую роль в сезонном регулировании стока.

Гидрологический режим реки характеризуется выраженной сезонностью: пик стока приходится на весенне-летний период, обусловленный таянием снега и ледников. До 70-80% годового объёма стока формируется за счёт этих природных источников. Вдоль течения Чирчика развита крупномасштабная ирригационная и энергетическая инфраструктура, включающая оросительные каналы, насосные станции и гидроэлектростанции (в том числе Чарвакская ГЭС).

С учётом высокого уровня зависимости водного режима Чирчика от климатических факторов, его бассейн представляет собой репрезентативный объект для изучения зон формирования стока и количественной оценки влияния природных и антропогенных факторов. Применение геоинформационных технологий в сочетании с методами машинного обучения позволяет выявить пространственные закономерности формирования стока, построить предсказательные модели и обеспечить более надёжное научное обоснование для водохозяйственного управления в условиях климатической нестабильности.

Значение реки Чирчик в водохозяйственной системе региона

Современные климатические изменения всё более отчётливо проявляются в перераспределении водных ресурсов, что оказывает значительное влияние на устойчивость водоснабжения в засушливых и

горных регионах. В Центральной Азии, где основная часть речного стока формируется в высокогорьях за счёт таяния снега и ледников, наблюдаются системные изменения гидрологического режима. Повышение температур, смещение сроков снеготаяния, деградация ледников и изменение характера осадков приводят к усилению межгодовой и сезонной изменчивости стока, создавая риски для водохозяйственного планирования и трансграничного водопользования.

На этом фоне особое значение приобретает изучение гидрологически активных территорий, таких как бассейн реки Чирчик – одного из крупнейших притоков Сырдарьи, обеспечивающего водой значительную часть восточного Узбекистана. Река формируется на стыке высокогорных массивов Западного Тянь-Шаня, где сочетаются сложный рельеф, разнообразие климатических условий и наличие ледниковых источников питания. Сток Чирчика регулируется каскадом водохранилищ, обеспечивающих водоснабжение для населения, сельского хозяйства и промышленности Ташкентской области, а также выработку электроэнергии.

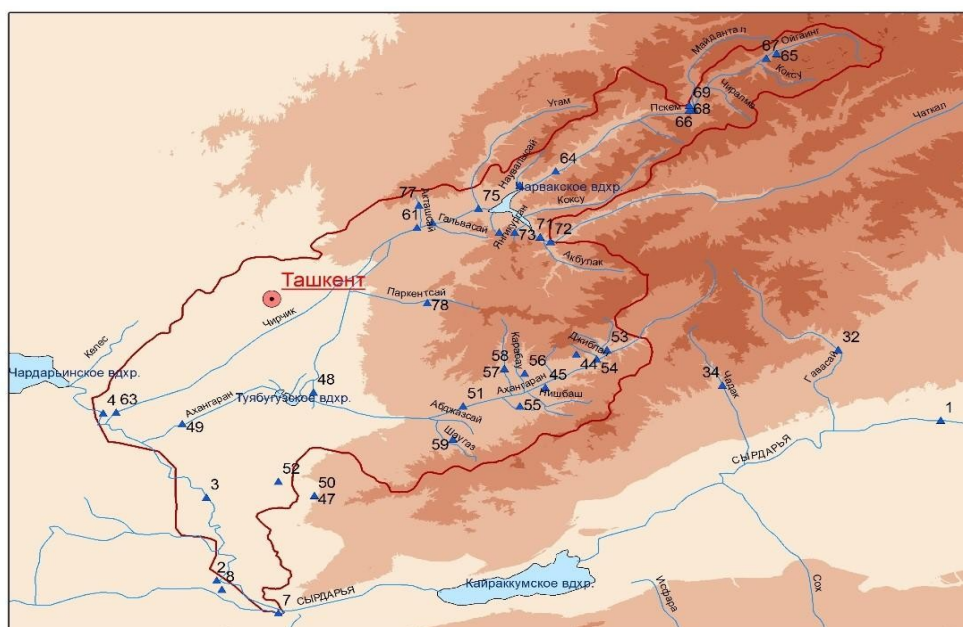


Рисунок 1. Карта-схема расположения гидрологических постов бассейнов рек Чирчика и Ахангарана

Комплексная водохозяйственная нагрузка, в сочетании с климатической изменчивостью, делает бассейн Чирчика уязвимым и одновременно показательным с точки зрения научного анализа. Его пространственная структура, гидрологическая динамика и зависимость от природных факторов делают данный регион важным объектом для исследования процессов формирования стока с использованием современных методов – геоинформационного анализа и алгоритмов машинного обучения. Такие подходы позволяют не только более точно оценить текущие условия, но и прогнозировать водные ресурсы в контексте будущих климатических сценариев.

Проблема колебаний стока р. Чирчик по годам. Межгодовая изменчивость стока является характерной чертой гидрологического режима реки Чирчик и представляет собой существенную проблему в контексте водохозяйственного регулирования. Сток формируется преимущественно за счёт снегового и ледникового питания в высокогорных районах Западного Тянь-Шаня, что обуславливает его высокую чувствительность к климатическим условиям конкретного года (см. рисунок 2).

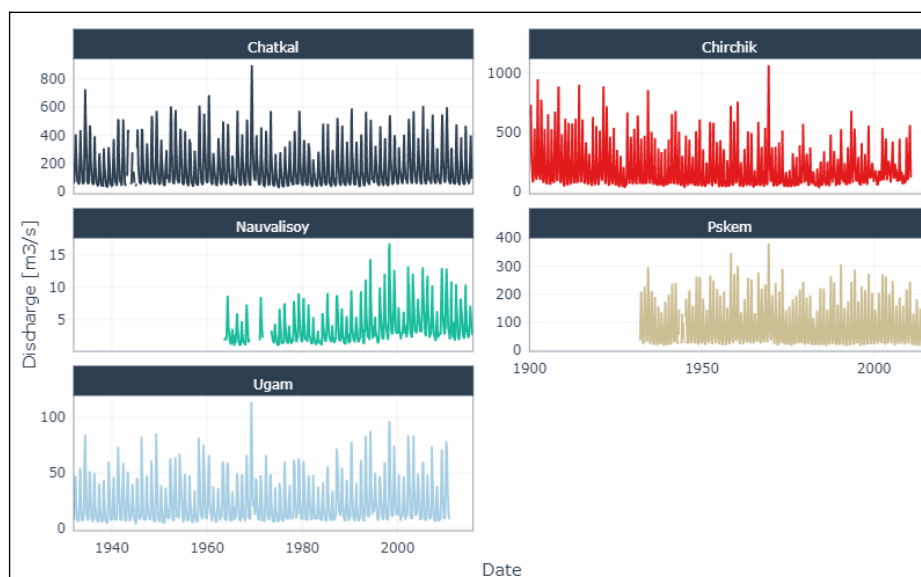


Рисунок 2. Межгодовая изменчивость стока бассейна реки Чирчик

Анализ многолетних гидрологических данных (1991-2022 гг.) показал, что годовые объёмы стока реки Чирчик могут варьироваться более, чем в два раза между годами с минимальной и максимальной водностью. Маловодные годы характеризуются снижением зимних осадков, поздним формированием снежного покрова и прохладной весной, что приводит к снижению водности основных притоков реки. В эти годы наблюдалось существенное уменьшение весеннего половодья, что оказывало прямое влияние на объёмы орошения и выработку электроэнергии в нижнем течении. Напротив, в многоводные годы раннее снеготаяние, тёплая весна и таяние ледников вызывают резкий рост стока и риск паводков. Это приводило к резкому увеличению стока в весенне-летний период, нередко сопровождаемому рисками паводков и перегрузки водохозяйственной инфраструктуры.

Такие экстремальные колебания затрудняют долгосрочное и оперативное водохозяйственное планирование и требуют перехода от традиционных методик оценки водности к более гибким и прогностически ориентированным подходам. В частности, особую актуальность приобретает использование методов геоинформационного анализа и алгоритмов машинного обучения, способных выявлять скрытые зависимости между климатическими переменными, характеристиками водосбора и формированием стока в условиях климатической нестабильности.

Целью настоящего исследования является определение пространственной зоны формирования стока в бассейне реки Чирчик и количественная оценка вклада природных факторов, обуславливающих межгодовую изменчивость водности. Для достижения поставленной цели используются методы геоинформационного анализа и алгоритмы машинного обучения, позволяющие интегрировать разнородные пространственные и временные данные (рельеф, климат, землепользование, ледниковое покрытие и др.) и выявить ключевые детерминанты стока. Особое внимание уделяется анализу условий формирования стока в годы различной водности

(маловодные и многоводные), что позволяет обоснованно подходить к оценке водных ресурсов и их прогнозированию в условиях климатической изменчивости.

Материалы и методы. Для проведения исследования использовались разнородные пространственные и временные данные, охватывающие гидрологические, климатические и геоморфологические параметры бассейна реки Чирчик: *цифровая модель рельефа (DEM)* – в качестве основы для орографического анализа применялась цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным разрешением 30 м, доступная через платформу Google Earth Engine (GEE). DEM использовалась для построения водоразделов, оценки высот, уклонов, направления и аккумуляции потоков (см. рисунок 3); *покров земной поверхности* – информация о землепользовании получена из глобального набора данных ESA WorldCover 2020 с разрешением 10 м, предоставленного Европейским космическим агентством. В рамках анализа были выделены ключевые классы: леса, пастбища, снежный покров, ледники, орошаемые земли и урбанизированные зоны (см. рисунок 4); *гидрометеорологические данные (1991-2022 гг.)* – использованы суточные данные об объёмах стока и метеорологические наблюдения с семи гидропостов и метеостанций, расположенных в пределах бассейна Чирчика (Чирчик, Пскем, Чаткал, Коксу, Наувалысай, Угам) (см. рисунки 5, 6); *климатические данные* – для климатической характеристики территории использовались данные двух источников: а) ERA5-Land (реанализ ECMWF, разрешение ~9 км, дневной шаг); б) CHELSA v2.1 (климатическая модель высокого разрешения, 1 км, среднемесячные значения). Оба источника обеспечивали сопоставление температуры, осадков и других климатических переменных за период 1991-2022 гг.; *гляциологические данные* – контуры ледников были получены из Randolph Glacier Inventory (RGI) версии 7.0, охватывающего Центральную Азию. Данные позволяют оценить площадь и распределение ледников в

пределах верховьев бассейна и включены в качестве пространственного признака при моделировании стока.

Геоинформационный анализ. Анализ пространственной структуры водосбора и характеристик рельефа был выполнен с использованием функционала QGIS и библиотек GRASS/SAGA.

Цифровая модель водораздела: На основе DEM была выполнена автоматическая генерация гидрологических водоразделов с помощью алгоритма D8 (deterministic eight node pour point model). Были идентифицированы главные стоки, границы суббассейнов, а также вычислены орографические параметры (уклон, экспозиция, средняя высота).

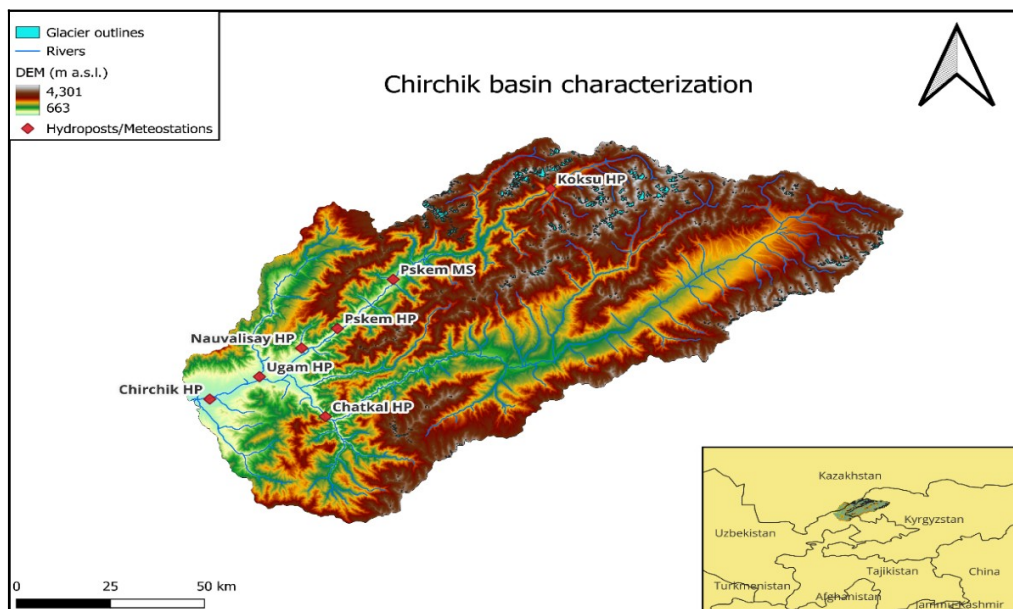


Рисунок 3. Цифровая модель бассейна реки Чирчик

На рисунке 3 представлена цифровая модель бассейна (ЦМР), охватывающая высотный диапазон от 663 м до 4301 м над уровнем моря. Наиболее высокогорные районы расположены на востоке и северо-востоке бассейна – это верховья рек Коксу, Пскем и Чаткал. Именно здесь сосредоточены ледники, обозначенные на карте бирюзовым цветом, что указывает на важную роль ледникового питания в формировании стока. Вдоль долин рек рельеф постепенно понижается к западу, где река Чирчик уже выходит на равнинную территорию. Основные водотоки – Пскем, Чаткал, Угам и Коксу – сливаются, образуя реку Чирчик, которая далее впадает в

Сырдарью. Речная сеть особенно развита в горных районах, где многочисленные водотоки формируются за счёт обильных осадков, таяния снежного покрова и ледников, что свидетельствует о высоком уровне водообразования в этих частях бассейна. На карте показаны пункты наблюдений – гидропосты и метеостанция, расположенные в разных частях бассейна, включая как горные, так и предгорные районы. Такое размещение позволяет отслеживать изменения климата и стока на разных высотах и обеспечивает более полное представление о водных ресурсах и их динамике.

Карта в основном показывает, что бассейн реки Чирчик имеет трансграничный характер, так как находится на территории трёх стран – Узбекистана, Казахстана и Кыргызстана. Это важно для общего понимания, как распределяются водные ресурсы между странами, и почему необходимо совместное управление. Наглядно видно, как реки начинаются в горах одной страны, а потом протекают через другие, что делает сотрудничество особенно актуальным.

Бассейн реки Чирчик характеризуется разнообразным землепользованием (см. **рисунок 4**). На большей части территории преобладают травянистые ландшафты, особенно в центральной и восточной части. В горных районах заметны участки с редкой или открытой растительностью, а также зоны снежного и ледникового покрова. Лесные массивы и кустарниковая растительность сосредоточены в предгорьях и вдоль русел рек.

Сельскохозяйственные земли и населённые пункты занимают преимущественно западную часть, ближе к устью реки Чирчик. Здесь же расположены основные водохранилища и постоянные водоёмы. Такое распределение указывает на то, что хозяйственная деятельность в бассейне сосредоточена в низинах, в то время как верховья играют важную роль в поддержании водного баланса и природного разнообразия.

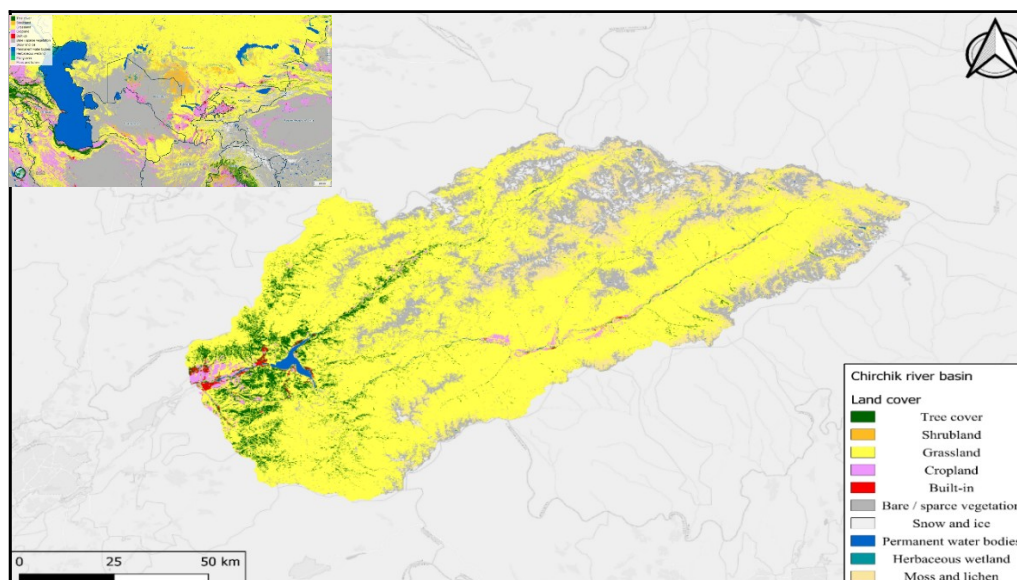


Рисунок 4. Карта землепользования бассейна реки Чирчик

Визуализация почвенного покрова бассейна реки Чирчик была выполнена с использованием облачной платформы **Google Earth Engine (GEE)**, которая обеспечивает доступ к глобальным пространственным базам данных и инструментам для анализа.

С помощью инструментов GEE были произведены пространственная привязка, фильтрация по территории бассейна и визуализация почвенных типов. Для наглядного отображения применена **категориальная цветовая шкала**, в которой каждому типу почвы сопоставлен отдельный цвет. Это позволило отразить пространственное распределение почв в пределах водосборной территории без привязки к количественным показателям. Созданная карта использовалась для последующего анализа почвенно-гидрологических характеристик бассейна, оценки почвенного разнообразия, а также выявления территорий с потенциально разной водоудерживающей и инфильтрационной способностью (см. **рисунок 4**).

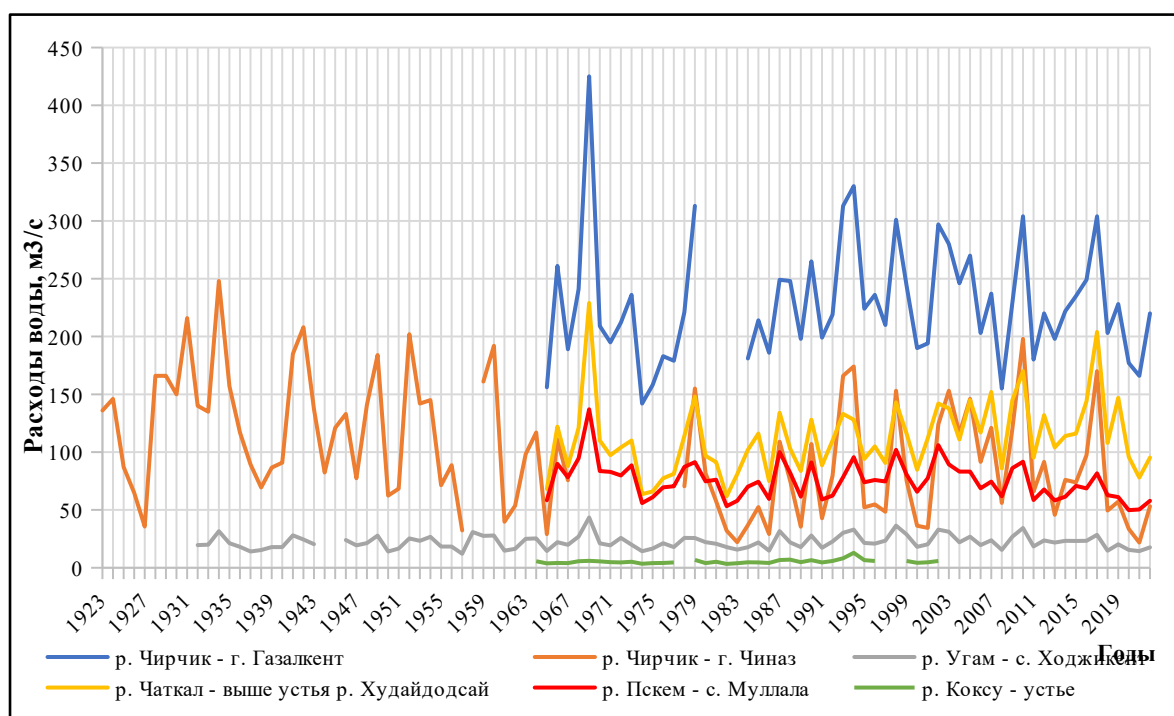


Рисунок 5. Многолетние среднегодовые колебания расходов воды рек бассейна р. Чирчик

На рисунке 5 проиллюстрирован тренд многолетних среднегодовых расходов воды в бассейне реки Чирчик. Видны существенные межгодовые колебания, которые могут быть обусловлены как климатическими факторами (изменение снежного запаса, температуры воздуха, осадков), так и техногенным регулированием стока. На определённых отрезках наблюдаются тенденции к снижению стока, особенно в последние десятилетия, что может свидетельствовать о росте водопотребления, изменении режима таяния и деградации криосферы.

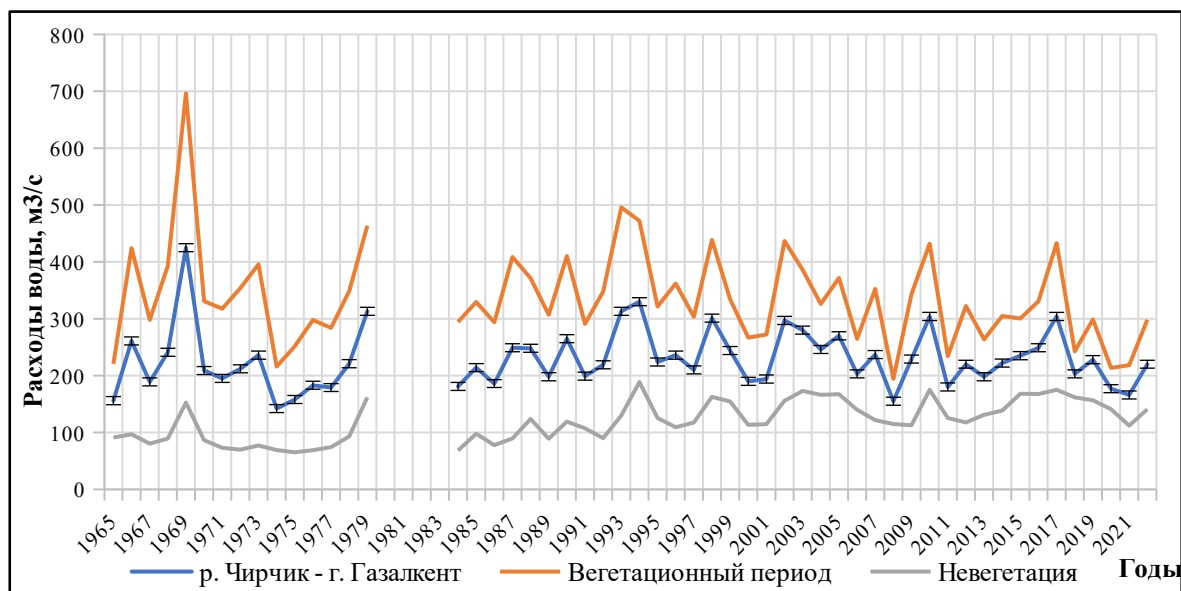


Рисунок 6. Колебания среднегодовых расходов воды реки Чирчик в вегетационный и невегетационный периоды за 1965-2022 годы

На рисунке 6 отражена сезонная структура водообеспеченности: явно различаются расходы в вегетационный (апрель-сентябрь) и невегетационный (октябрь-март) периоды. Вегетационный период характеризуется высокими значениями расходов, что связано с таянием снегов и повышенным водопотреблением на орошение. Тренды указывают на более выраженное снижение стока в летний сезон, что особенно критично с учётом потребностей аграрного сектора. Это может указывать как на климатические изменения, так и на рост антропогенной нагрузки.

В таблице 1 приведено сравнение среднемесячных расходов воды за два климатических периода: 1965-1990 (базовый) и 1991-2022 (текущий) годы. Во всех месяцах отмечено увеличение среднемесячного стока. Особенно это заметно в зимние месяцы (декабрь-февраль), где увеличение достигает 50-70% (например, январь: с 80 до 135 м³/с). В весенне-летние месяцы (май-июль) также наблюдается повышение, но в меньшей степени, особенно в июне и июле, что связано с изменениями во времени наступления пикового таяния снегов или регулированием стока водохранилищами. Годовой сток увеличился с **221 м³/с** до **234 м³/с**, что подтверждает общее повышение водоотдачи, но также указывает на перераспределение стока в течение года.

Таким образом, можно говорить о сезонной трансформации водного режима: уменьшение амплитуды между пиковыми и низкими значениями и сдвиг сезона водности в сторону зимне-весеннего периода.

Таблица 1. Изменения расходов воды реки Чирчик (м³/с) в створе города Газалкент за различные периоды

Климатические периоды	Месяцы												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1965-1990	81,2	80,1	111	221	374	555	468	323	156	102	89,1	83,0	221
1991-2022	135	135	155	204	342	482	438	317	180	146	132	137	234

На рисунке 7 представлены профили среднемесячного стока по двум климатическим периодам, что позволяет визуализировать перераспределение стока во времени. Заметно увеличение расходов в зимне-весенние месяцы (январь-апрель), что может быть следствием повышения температуры воздуха, более раннего снеготаяния и уменьшения накопления снега. В летние месяцы (июнь-август) прирост стока менее выражен или стабилен, что может отражать влияние водоотбора на ирригацию или задержку воды в водохранилищах. Повышение расходов в осенние месяцы (сентябрь-ноябрь) указывает на возможность увеличения осадков в это время года или на вторичное таяние ледников. График демонстрирует сглаживание сезонной кривой стока, что типично для регионов, испытывающих последствия климатических изменений и сильного техногенного регулирования.

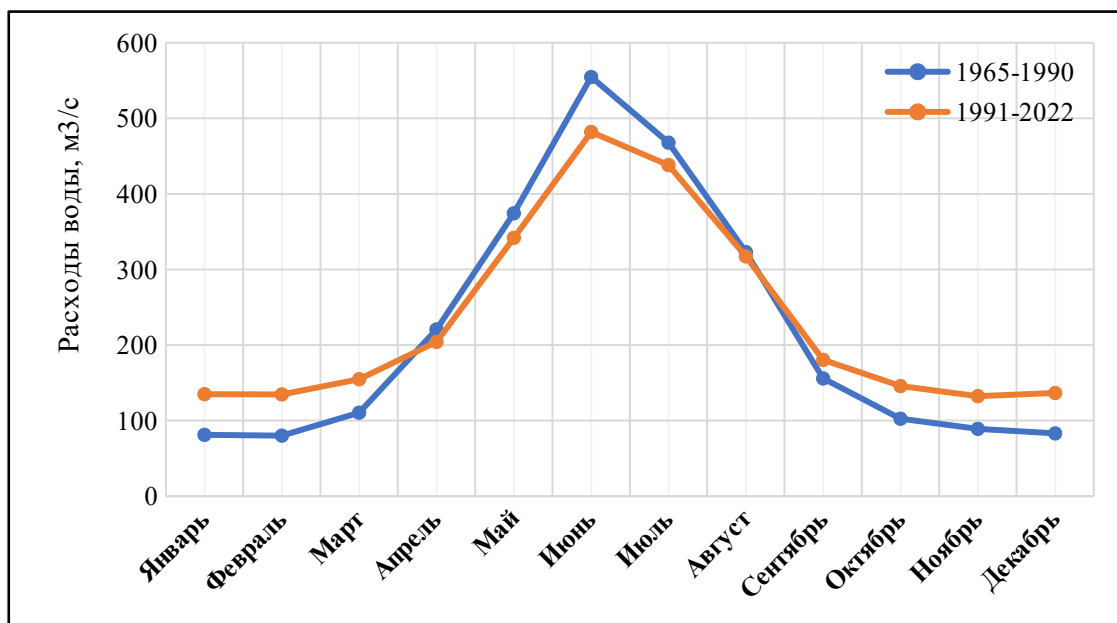


Рисунок 7. Изменение среднемесячных расходов воды реки Чирчик за базовый и текущий климатические периоды

Тем самым, профили среднемесячного стока, исходя из рисунка 7, построенные для базового и текущего климатических периодов, свидетельствуют о перераспределении водного потока в годовом цикле: увеличение расходов в зимне-весенние месяцы и сглаживание сезонной амплитуды.

На рисунке 8 продемонстрировано пространственное распределение высотных отметок русловой сети бассейна реки Чирчик. Визуализация основана на данных цифровой модели рельефа, что позволило отразить орографические особенности местности с изменением абсолютных высот от верховьев к низовьям водотоков, начиная с высокогорных районов источников рек до равнинных участков впадения. Это позволяет выделить орографическую структуру бассейна, определить зоны формирования стока, а также обеспечить основу для последующего расчёта гидрологических параметров, включая направление стока, уклоны и разграничение суббассейнов.

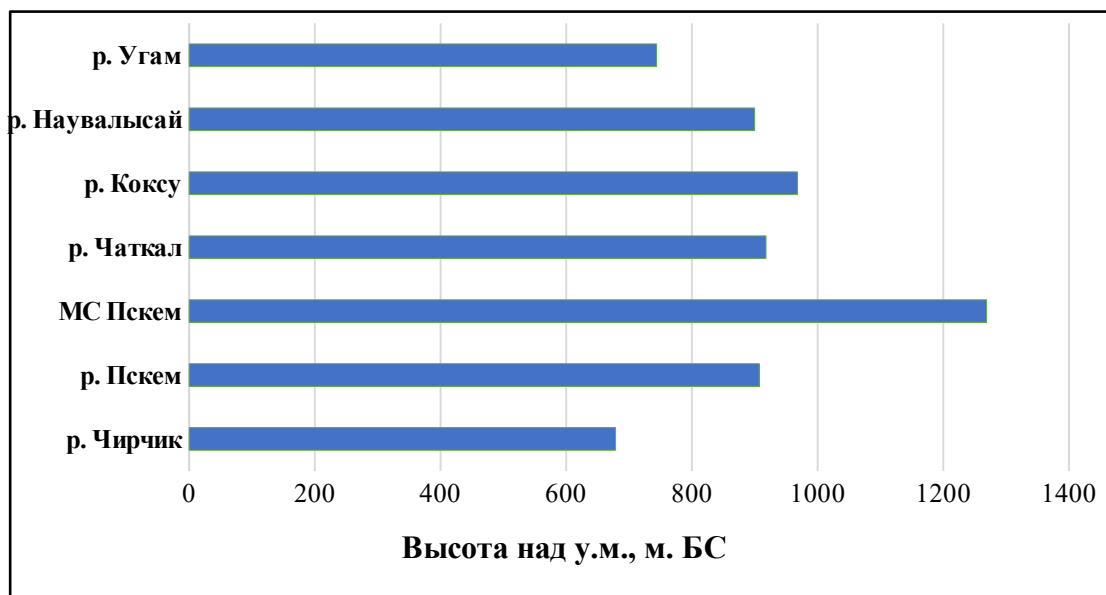


Рисунок 8. Высота над уровнем моря водотоков бассейна р. Чирчик

Бассейн реки Чирчик охватывает важные горные и предгорные территории Восточного Ташкентского региона и формируется за счёт слияния рек Чаткал и Пскем, далее принимая в себя другие притоки. Питание рек преимущественно снеговое и ледниковое, в верховьях – частично ледниково-снежное, в средних и нижних частях – в основном снеговое. Максимальный сток наблюдается в весенне-летний период (апрель-июль), что обусловлено интенсивным таянием снега и ледников в горах Чаткало-Кураминского хребта.

Для оценки межгодовой изменчивости водности были отобраны характерные годы по данным гидропостов Узгидромета, классифицированные как многоводные (МН), средние по водности (СР) и маловодные (МЛ). Такая классификация применяется в гидрологических исследованиях для анализа устойчивости речного стока и оценки водных ресурсов в различных климатических условиях.

Наиболее водообильным годом для всей Центральной Азии, включая бассейн Чирчика, считается 1969 год. Он отличается рекордными значениями стока, связанными с высокими запасами снега и благоприятными условиями для его равномерного таяния. Также к многоводным годам можно отнести

1998, 2010 годы и другие, вошедшие в эту группу по наблюдениям на большинстве рек бассейна.

Средние по водности годы, такие как 1970, 2004 и другие, характеризуются типичными условиями формирования стока и представляют собой эталонные периоды для оценки водного баланса и моделирования. Эти годы важны для расчетов в условиях "нормального" водного режима.

Маловодные годы (например, 1984, 2000 и 2020) связаны с дефицитом осадков и повышенными температурами воздуха в холодное время года, что снижает накопление снежного покрова и сокращает приток в паводковый период. Они особенно важны при анализе рисков водного дефицита, оценки минимального водоснабжения и разработки адаптационных мер в условиях климатических изменений.

Выбор таких лет позволяет охарактеризовать водный режим бассейна в различные по обеспеченности годы и использовать эти периоды при калибровке гидрологических моделей (например, в WEAP или SWAT), планировании водопользования и управлении водными ресурсами. В таблице 2 ниже отражена классификация характерных лет по водности (годы с многолетним, средним и минимальным стоками рек) на основе многолетних наблюдений.

Таблица 2. Общие годы для всех выбранных гидропостов бассейна р. Чирчик

МН	СР	МЛ
1969	1970	1989
1979	2004	1991
1987	2014	2008
1998		2000
2002		2018
2003		2020
2010		2022

На основе гидрологического районирования с использованием модели HRU (Hydrological Response Units) была выполнена классификация высотной

структуры бассейна реки Чирчик. Пространственное распределение высотных отметок на территории бассейна иллюстрирует ярко выраженную вертикальную зональность, охватывающую диапазон от 867 до 4103 метров над уровнем моря.

Для целей анализа высотная зональность бассейна была классифицирована по 43 равным интервалам, полученным из модели HRU (см. рисунок 9). Эти интервалы были агрегированы в четыре укрупнённые орографические зоны (таблица 3). Эта дискретизация домена позволяет гидрологическим единицам реагирования (HRU) представлять высотные полосы, и дифференциальное таяние происходит по высотным зонам, при этом низколежащие HRU испытывают таяние в начале сезона, а вышележащие водосборы показывают соответствующую задержку реакции.

Таблица 3. Орографическая классификация высотных зон в бассейне реки Чирчик

Зона	Диапазон, м	Назначение
Низкогорная зона	867 – ~1500 м	Равнины, долины, населённые пункты
Среднегорная зона	~1500 – 3000 м	Основная часть склона, активное формирование стока
Высокогорная зона	~3000 – 4000 м	Область снегозапаса, крутые склоны
Нивальная зона	>4000 м	Области постоянного снегового покрова, ледники

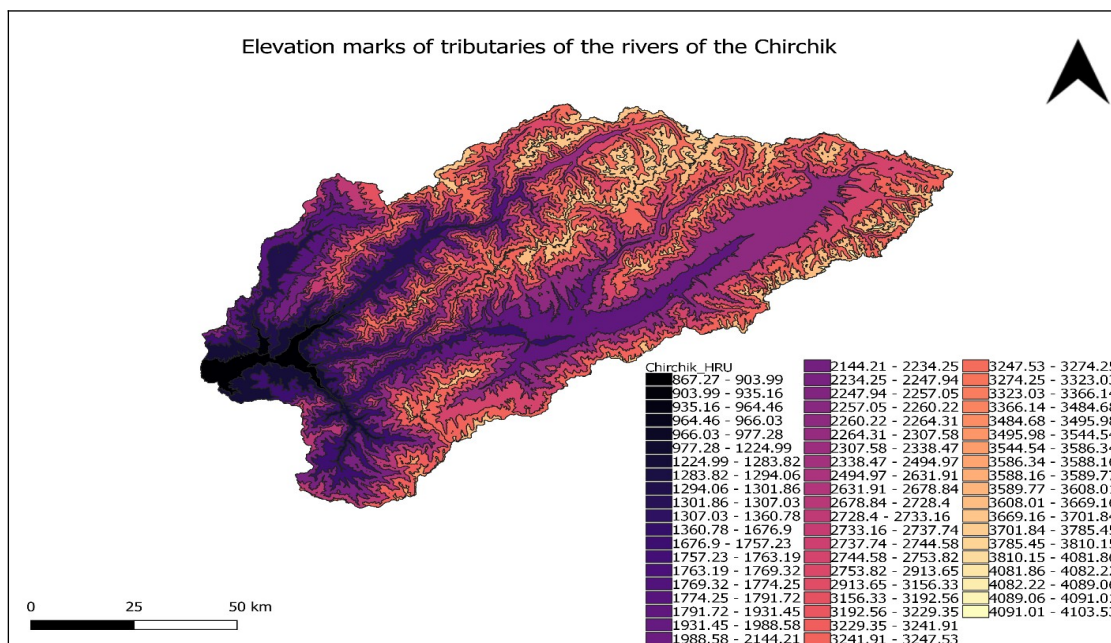


Рисунок 9. Зонирование бассейна реки Чирчик по абсолютным высотам на основе модели HRU

Низкогорная часть бассейна (до 1500 м) представлена преимущественно долинами основных рек и их притоков – Газалкент, Пскем, Коксу и др. Эти участки характеризуются относительно ровным рельефом и наибольшей хозяйственной освоенностью. Среднегорная зона (от 1500 до 3000 м) занимает значительную часть водосборной территории и представлена более расчленённым рельефом, где происходит формирование основного объёма поверхностного стока. Высокогорные участки (3000-4000 м) охватывают склоны и верховья крупнейших притоков бассейна – Чаткал, Пскем, Коксу и Угам. Наиболее возвышенные зоны (свыше 4000 м) локализуются в восточной и северо-восточной части бассейна и характеризуются условиями нивационного и ледникового питания.

Проведённое зонирование позволяет более детально учитывать орографические особенности бассейна при моделировании гидрологических процессов, оценке водных ресурсов, а также при планировании адаптационных мер в условиях изменения климата. Высотная структура оказывает значительное влияние на температурный режим, характер осадков и сезонную динамику стока, особенно в снежно-ледниковых районах, от которых во многом зависит устойчивость водоснабжения всего региона.

Результаты. В результате пространственного анализа, выполненного на основе цифровой модели рельефа (DEM) и инструментов гидрологической обработки в среде Google Earth Engine, были выделены ключевые зоны формирования стока в бассейне реки Чирчик. Наибольший вклад в поверхностный сток обеспечивают высокогорные участки с абсолютными отметками свыше 2500 м, расположенные в верховьях притоков Пskem, Угам и Чаткал. Эти районы характеризуются значительными уклонами (более 15°), выраженным снежным и ледниковым питанием, а также маломощными почвами на фоне пастбищ и скальных ландшафтов.

Орографическая зональность, распределение осадков и структура землепользования были определены как основные природные факторы, формирующие пространственную неоднородность водного режима. Пространственное разрешение используемых данных (30 м для DEM, 1–9 км для климатических реанализов) обеспечивает приемлемый уровень детализации, однако не позволяет учесть локальные особенности стока, такие как микропаводки или мелкомасштабные снеговые процессы. Кроме того, низкая плотность гидрометеорологической сети в горных районах затрудняет точную валидацию результатов.

Заключение. Исследование позволило выделить ключевые закономерности формирования стока в бассейне реки Чирчик и определить главные природные факторы, влияющие на водность. Основными среди них являются: высота, уклон, количество осадков, температурный режим, площадь оледенения и структура землепользования. В многоводные годы доминирует влияние снегового и ледникового питания, тогда как в маловодные возрастает роль локальных климатических условий.

Использование цифровых моделей рельефа, климатических реанализов и средств Google Earth Engine позволило сформировать воспроизводимую и масштабируемую методологию оценки стока в труднодоступных горных

районах. Полученные данные могут применяться в задачах водохозяйственного планирования и оценки климатических рисков.

В дальнейших работах планируется расширение аналитического подхода путём включения алгоритмов машинного обучения, что позволит более точно учитывать комплексные зависимости и повысить надёжность гидрологических прогнозов.

Использованные источники:

1. Shukurov A., et al. Impact of glaciers on Central Asian river flow // *Journal of Glaciology*. – 2018. – Vol. 64, No. 245. – P. 123-135.
2. Kurbanov M., Abdullayev A. Hydrological regime of the Chirchik river basin under climate variability // *Central Asian Journal of Water Research*. – 2017. – Vol. 3, No. 2. – P. 45-58.
3. Feng, X., et al. High-resolution precipitation patterns in mountainous regions. *Journal of Hydrology*. – 2019. – Vol. 575, P. 954-969.
4. Ivanov, V., et al. Challenges in hydrometeorological data acquisition in mountain basins. *Hydrological Sciences Journal*. – 2017. – Vol. 62(8), P. 1315-1327.
5. Hersbach H., et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2020. – Vol. 146, No. 730. – P. 1999-2049.
6. Karger D.N., et al. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas // *Scientific Data*. – 2017. – Vol. 4. – Article 170122.
7. Wang, Q., et al. Climate influence on streamflow variability in mountainous regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, – 2021. – Vol. 25, P. 2893-2910.
8. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. *Geographic Information Systems and Science*. – 4th ed. – Wiley, 2015. – 512 p.
9. Burrough P.A., McDonnell R.A. *Principles of Geographical Information Systems*. – Oxford University Press, 1998. – 333 p.

10. Randolph Glacier Inventory (RGI), Version 7.0 // *Global Glacier Database*. – 2017. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.glims.org/RGI/>.
11. ESRI. *ArcGIS Pro Documentation*. – 2020.
12. Google Earth Engine (GEE). Облачная платформа для обработки спутниковых и геопространственных данных.
13. ESA WorldCover. Данные по землепользованию с высоким разрешением.
14. SAGA GIS и GRASS GIS. Свободные ГИС-пакеты для пространственного и гидрологического анализа.