ГИДРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

HYDROLOGY AND CLIMATOLOGY

УДК 556.5 + 57.087 https://doi.org/10.5281/zenodo.18029266

Мягков С.В., Махмудов Б. Б., Дергачева И.В.

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Ташкент, Узбекистан

АНАЛИЗ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕКИ ШАХИМАРДАН ГРАФИЧЕСКИМ И РЕГРЕССИОННЫМ МЕТОДАМИ

Аннотация. *Реки, формирующиеся на склонах Алайского хребта, имеют важное значение для ведения водного хозяйства Узбекистана. Основным потребителем воды реки Шахимардан является орошаемое земледелие. Любые изменения, влияющие на водные ресурсы, имеют высокий эффект воздействия на различные социально-экономические сектора развития стран региона. Целью данного исследования является определение доли составляющих речного стока в бассейне горной реки для дальнейших расчетов объемов и прогнозирования стока. Представлены основные концепции и теории, положенные в основу исследования. На основе математической модели формирования стока горных рек проведен анализ многофакторной зависимости и определен объем ледникового стока при различных климатических параметрах. Методология исследования включает построение общей математической модели формирования стока горных рек, зависящего от накопления снега в зимний период и таяния ледников в летний период. Полученные результаты показали, что в зависимости от климатических параметров текущего года доля ледникового стока реки Шахимардан колеблется от 10% до 40%. Изменение климата изменяет речной сток и оказывает значительное влияние на жизнеобеспечение и окружающую среду. Нехватка пресноводных ресурсов увеличивает риски для чистой воды и санитарии. Формула расчета может быть использована для прогнозирования доли ледникового стока в зависимости от изменения климата при известных климатических сценариях.*

Ключевые слова: *речной сток, компоненты стока, изменение климата, множественная регрессия, гидрологические расчеты, ледниковый сток, осадки, гидрология.*

Myagkov S.V., Makhmudov B.B., Dergacheva I.V.

Scientific Research Hydrometeorological Institute, Tashkent, Uzbekistan

ANALYSIS OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE SHAKHIMARDAN RIVER BY GRAPHIC AND REGRESSION METHODS

Abstract. *The rivers that form on the slopes of the Alai Range are of great importance for water management in Uzbekistan. The main consumer of the Shakhimardan River water is irrigated agriculture. Any changes that affect water resources have a high impact on various socio-economic sectors of development in the countries of the region. The purpose of this study is to determine the share of river runoff components in the mountain river basin for further calculations of volumes and runoff forecasting. The main concepts and theories that underlie the study are presented. Based on the mathematical model of mountain river runoff formation, an analysis of the multifactorial dependence is carried out and the volume of glacial runoff is determined under various climatic parameters. The research methodology includes the construction of a general mathematical model of mountain river runoff formation, which depends on snow accumulation in winter and glacier melting in summer. The results show that, depending on the climatic parameters of the current year, the share of glacial runoff*

of the Shakhimardan River ranges from 10% to 40%. Climate change alters river flows and has significant impacts on livelihoods and the environment. Scarcity of freshwater resources increases risks for clean water and sanitation. The calculation formula can be used to predict the share of glacier runoff depending on climate change under known climate scenarios.

Keywords: *river runoff, runoff components, climate change, multiple regression, hydrological calculations, glacier runoff, precipitation, hydrology.*

Введение и постановка проблемы. Сток реки Шахмардан определяется таянием ледников Алайского хребта в зависимости от температуры воздуха. Осадки влияют на толщину снежного покрова в бассейне реки и пополняют объем ледникового покрова. Изменение климата оценивается по изменению температуры приземного слоя воздуха на метеорологических станциях и выпадению осадков на поверхность.

В высокогорных районах бассейна Аральского моря много малых рек с ледниковым питанием. Глобальное изменение климата усилило интенсивность таяния высокогорных ледников. Динамика осадков в высокогорных районах изменяет толщину оледенения и запасы ледниковой массы. В бассейне реки Шахимардан происходят изменения элементов гидрологического цикла, связанные с изменением климата [6]. Многие исследования указывают на сокращение площади высокогорного оледенения Памиро-Алайской горной системы за период с 1960 по 2015 год с 20% до 40%.

По источникам питания реки Памиро-Алая относятся к рекам ледниково-снегового типа питания. Продвижение нулевой изотермы по высотным поясам во многом определяет интенсивность таяния ледников. Количество талой воды определяется количеством выпавших на водосборной площади осадков в зимний период. Ледники являются многолетними аккумуляторами осадков. Количество воды, накопленной в ледниках, и таяние льда определяется многими гидрометеорологическими параметрами - температурой приземного слоя воздуха, поступлением солнечной радиации на поверхность ледника, покрытостью ледника обломочными скальными материалами и другими.

Питание реки Шахимардан снего-ледниковое с пиком половодья в июне. С востока подпитывается водами реки Исфайрамсай по каналам Янгиарик, Ловон, с запада — водами реки Сох по Сох-Шахимарданскому каналу. Площадь водосбора 1300 км². Речные воды на территории Ферганской области смешиваются с водами Сохской оросительной системы, системы Большого Ферганского канала и Южного Ферганского канала, что естественно сказывается на её качественном составе.

В Центральной Азии в настоящее время наблюдается активная деградация горного оледенения. Это приводит к нарушению устойчивости моренно-ледниковых комплексов и является одним из ведущих факторов, обусловливающих формирование здесь селевых потоков гляциального генезиса. Трансграничность многих селевых бассейнов центральноазиатского региона и их хозяйственное освоение обусловливают необходимость выявления конкретных факторов, определяющих высокую степень их селевой опасности, а также оценки возможных последствий схода селей.

Бассейн реки Шахимардан является ярким примером рек Алайского хребта и характеризуется высокой степенью селевой опасности. Трансграничность реки и активное хозяйственное освоение приводит к тому, что селевые потоки становятся катастрофическими. В настоящее время наибольшую опасность представляют собой гляциальные сели и сели, образующиеся при прорывах ледниковых озёр.

В бассейне реки Шахимардан имеется множество моренных озер, вода в которых удерживается дамбами, сложенными обломочным материалом. В долине реки много каменных осыпей, которые доходят до водного потока и при прохождении прорывного паводка обломочный материал вовлекается в водный поток, увеличивая его объем, массу и скорость, что приводит к катастрофическим последствиям.

Изученность проблемы. Для моделирования ледникового стока используется подход, зависящий от температуры воздуха. В настоящее время многие исследования [1, 2] речного стока в горах отражают изучение тенденций режима изменения температуры воздуха и режимов осадков в речных бассейнах с последующим использованием полученных данных в математических моделях формирования стока и, соответственно, тенденций динамики стока, которые строятся в зависимости от сценариев изменения климата [19].

Научной основой полагают оценку трендов изменения стока горных рек непосредственно на основе динамики стока за различные климатические периоды с использованием линейных и полиномиальных статистических зависимостей.

По данным многочисленных исследований горной территории водосборного бассейна Памиро-Алая отмечается, что за период 1980-2010 гг. площадь оледенения существенно сократилась, что, в свою очередь, может привести к сокращению объема ледникового стока [15].

В работе [10] указывается, что современное глобальное потепление приведет к повышению уровня эвапотранспирации и к сокращению пополнения запасов подземных вод. В таких условиях любые простые, но эффективные средства увеличения запасов воды, такие как искусственное пополнение запасов подземных вод, становятся жизненно важными для устойчивости водоснабжения и выживания в экосистемах.

Рост плотности населения, экономическая активность, изменение режимов водопользования создают проблемы для ограниченных водных ресурсов, доступных людям. В исследовании [10] приводятся данные о том, что в Северном полушарии наблюдается некоторое увеличение расхода воды в реках, вызванное таянием ледников и общими процессами дегляциации, связанными с глобальным потеплением.

Исследования [2, 8, 21] показывают, что процессы деградации ледникового покрова в Азии продолжаются, однако таяние ледникового покрова не связано с гидрологическими показателями речного стока ниже по течению и не учитывает количество сезонного снежного покрова в речных бассейнах, что напрямую влияет на характеристики и объем речного стока.

В работах [9, 21] излагается концепция многовековой и внутривековой циклической изменчивости климата континентов Северного полушария, которая имеет место на протяжении последних 12 тыс. лет и происходит во временных интервалах 7-11, 32-45 и 70-80 лет. Изменчивость климата оценивается как составная часть единых природных циклов (гидроклиматических, геофизических, биологических). Это положение доказывается на материале по изменению гидрологических изменений аридных территорий.

В работах [7, 14] указывается, что малые реки, к которым относится река Шахимардан, особенно чувствительны к антропогенному воздействию и служат интегральным индикатором сложных природно-антропогенных процессов, происходящих на их водосборах.

В современных исследованиях территориальные структуры бассейнов рассматриваются как иерархические общности пространственных отношений, определяемых водным стоком. Международные научные организации [8, 21] отмечают, что изменение климата проявляется, в частности, в изменении гидрологического режима рек и режима оледенения водоемов.

Климат и водный цикл Земли тесно и сложно взаимосвязаны [18], поэтому динамика изменения климата повлияет на водные ресурсы. Например, дефицит осадков приведет к снижению влажности почвы, речного стока и пополнения запасов грунтовых вод, но величина этого эффекта перелива будет зависеть от местных условий, таких как свойства почвы, геология, растительность и использование воды.

Из-за различных временных масштабов вовлеченных процессов воздействие на подземные воды может длиться гораздо дольше, чем первоначальная метеорологическая засуха, вызвавшая его, тем самым инициируя «эффект памяти».

С другой стороны, наводнения могут повлиять на доступность воды, санитарию и другие аспекты жизнедеятельности людей, нанося ущерб ключевой инфраструктуре и услугам.

В то же время сам гидрологический цикл является важным компонентом климатической системы, контролирующим взаимодействие атмосферы и земной поверхности и обеспечивающим механизмы обратной связи в транспортировке, хранении и обмене массой и энергией.

На связь между климатом и водными ресурсами влияют многие антропогенные факторы – землепользование и изменение растительного покрова, регулирование водных ресурсов и системы забора воды, а также загрязнение воды. Изменение климата влияет на водный цикл через множество различных процессов [11].

Обратная связь и взаимодействие между этими процессами, которые не все полностью поняты или измеримы в соответствующих масштабах, делают количественную оценку и прогнозирование воздействий очень сложными.

Хотя гидрологические данные, собранные в прошлом, предоставляют ценную информацию о процессах и событиях, они не обязательно указывают на будущие гидрологические режимы. Более того, даже когда обнаруживаются гидрологические изменения, атрибуция причин, включая изменение климата, часто остается неопределенной [20].

В исследовании [16] утверждается, что оценка влияния изменения климата на водные ресурсы бассейна позволит учитывать возможные изменения гидрологических характеристик при планировании развития сельского хозяйства и других отраслей экономики, а также при разработке мер адаптации.

В горных районах Гималаев таяние ледников объясняется повышением температуры приземного воздуха на обширных территориях [12]. За длительный период наблюдений установлено, что произошло существенное изменение массы ледников [13]. Как указано, существенные потери массы ледников произошли в период 1948-2006 гг. В США также произошли существенные потери массы ледников [16].

По данным исследований [3], наблюдаются изменения стока, связанные с таянием ледников и многолетних снежников. В горных системах, расположенных в верховьях реки Янцзы, также наблюдается сокращение высокогорного оледенения [17].

Бассейн реки Шахимардан расположен на северных склонах Алайского хребта. Река Шахимардан является трансграничным речным бассейном, расположенным на территории Узбекистана и Кыргызстана. Ледниковая зона расположена на территории Кыргызстана, основная часть стока реки Шахимардан используется на орошение в Узбекистане и водоснабжения Ферганы и окрестностей. На реке имеется гидрологический пост и гидрометеорологическая станция.

Средний многолетний расход воды 11,6 м³/с, норма расхода 9,66 м³/с, среднегодовой сток 304 млн м³ (на створе «Павулган»), в средний по водообеспеченности год — 275 млн м³, что составляет 1,5 % стока Ферганской долины. В паводки расход достигает 64 м³/с. Средняя минерализация воды в вегетационный период 0,24 г/л, в невегетационный период — 0,18 г/л.

Цель и задачи работы. Цель исследований – выявить гидрологические особенности стока реки Шахимардан и определить основные параметры гидрологического режима реки для прогнозирования различными методами. Задачи исследований: определить гидрологические особенности формирования стока реки Шахимардан и показать различия внутригодового распределения стока и за многолетний период.

Объект исследований – гидрологический режим реки Шахимардан и возможности его математического моделирования. Предмет исследований – математическое моделирование гидрологического режима стока реки Шахимардан с разбивкой на талую снеговую и ледниковую составляющие.

Материалы и методы. Для выявления особенностей гидрологического режима реки Шахимардан использовались материалы гидрологических наблюдений на посту «выше реки Дуговая» и гидрометеорологических наблюдений на метеостанции «Шахимардан». Для определения гидрологических характеристик использовалось математическое моделирование процесса формирования стока в период вегетации и многофакторный статистический метод, используемый для описания изменчивости среди наблюдаемых, коррелированных переменных с точки зрения потенциально меньшего числа ненаблюдаемых переменных, называемых факторами, которые изложены ниже.

Математическая модель. Формирование стока горной реки происходит в результате таяния выпавшего зимой снежного покрова, таяния ледников летом, притока грунтовых вод и дождей.

Для построения математической модели формирования стока необходимо рассмотреть режим хода гидрометеорологических параметров, формирующих сток реки. Основным фактором, определяющим сток реки, являются осадки.

Рассмотрим графическое представление режима осадков в бассейне реки Шахимардан. На рис. 1 представлен график осадков по месяцам, по которому затруднительно выделить режим выпадения осадков в течение года. На рис. 2 представлен режим осадков на станции Шахимардан в виде суммы осадков за период наблюдений для каждого месяца отдельно. Становится сразу заметно, что в весенний период идет нарастание количества осадков до мая и затем идет спад вплоть до сентября. Иногда в сентябре осадки вообще не наблюдаются. Затем в октябре вновь начинают идти осадки. На этом рисунке наглядно представлен режим осадков в течение года. И хотя река относится к ледниково-снеговому типу питания, осадки за май-июль составляют значительный вклад в сток реки.

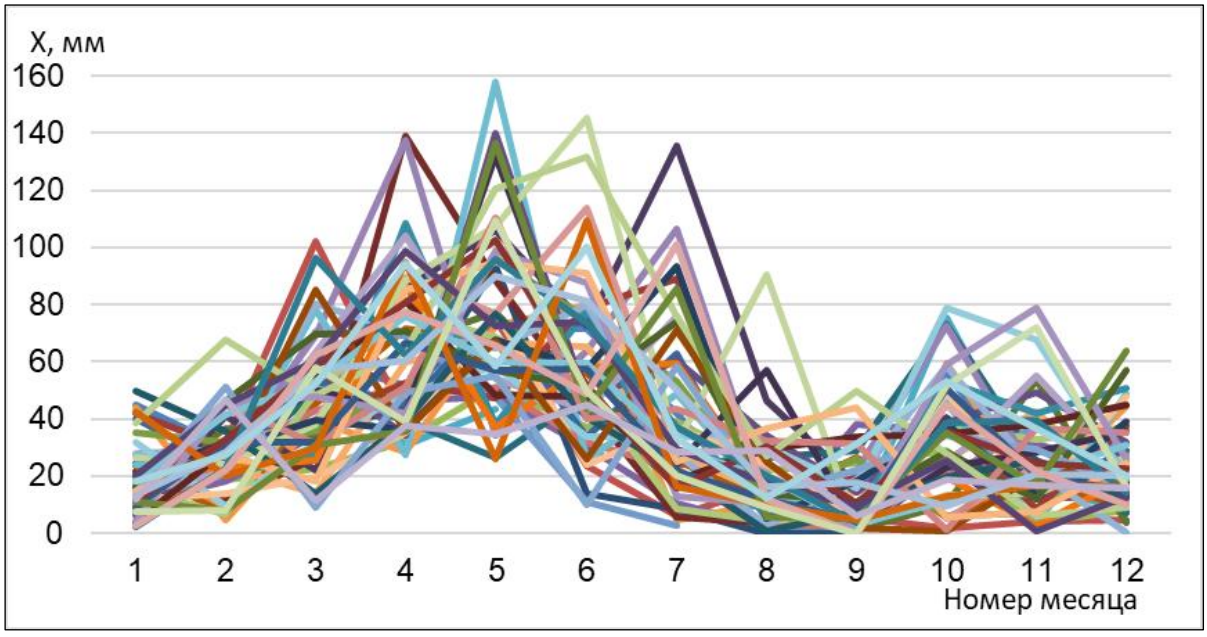


Рис. 1. Внутригодовое распределение осадков по одной станции Шахимардан по месяцам в среднем за период 1972-2024 годы

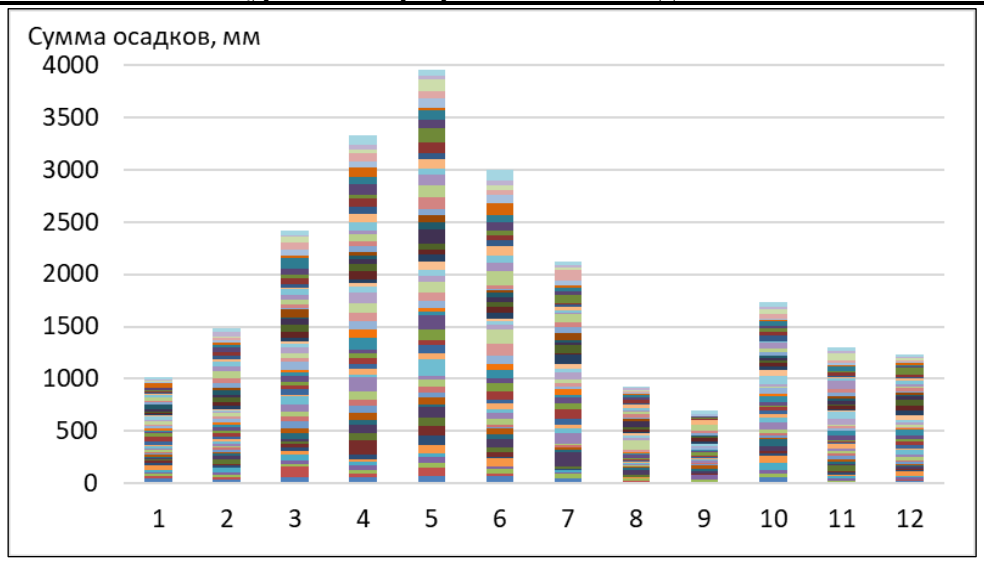


Рис. 2. Накопление сумм осадков по месяцам по метеостанции Шахимардан в среднем за период 1972 по 2024 годы

На рис. 3 представлен совмещенный график нормированных величин стока за период вегетации и суммы зимних осадков и стока реки Шахимардан, приведены полиномиальные тренды.

Вклад талой снеговой составляющей в сток реки Шахимардан имеет большое значение, так идет накопление снегового слоя за несколько зимних месяцев в период октябрь – март на горной территории бассейна при отрицательных температурах.

Если сток формируется пропорционально зимним осадкам, выпадающим на территории водосбора, таянию сезонных снегов и ледников, то в общем виде уравнение водного баланса на определенный период можно записать в виде:

$$Q = \alpha * P + \beta * T + \gamma \,, \qquad (1)$$

где: Q — приток воды в русло реки, P – осадки на водосборной площади, T - температура воздуха на метеостанции, α, β — коэффициенты пропорциональности, γ — некоторый постоянный коэффициент, характеризующий приток грунтовых вод и таяние снежников в оврагах.

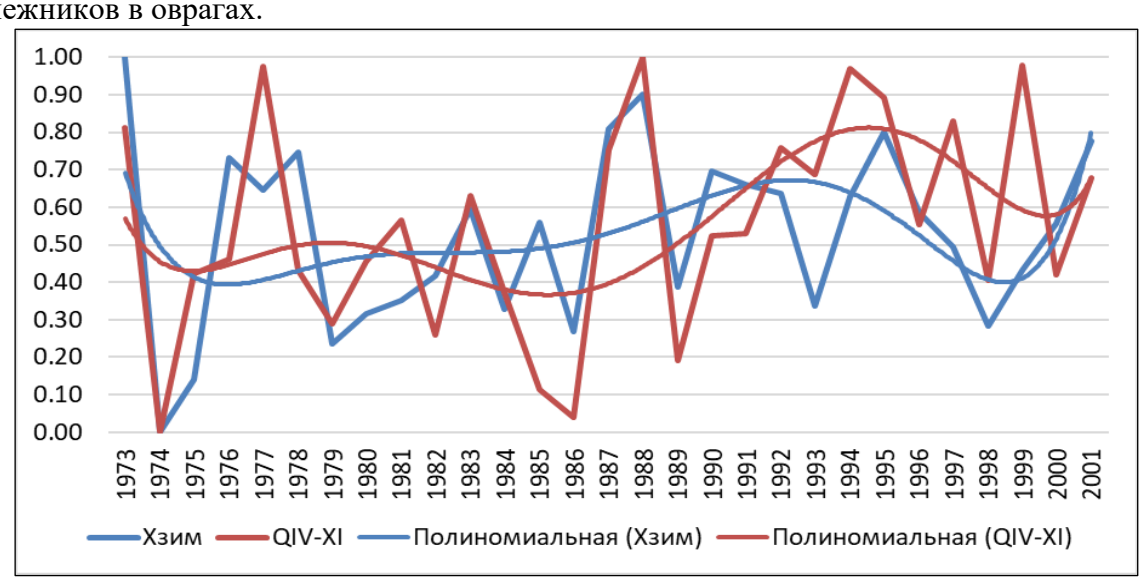


Рис. 3. Совмещенный график нормированных величин стока за период вегетации и суммы зимних осадков и стока реки Шахимардан. Приведены полиномиальные тренды

Для вегетационного периода использовано уравнение пропорциональности количества воды от количества осадков за зимний период (октябрь-март) количеству талых вод ледникового стока за летний период (июль-август):

$$Q_{IV-IX} = \alpha * P_{Winter} + \beta * T_{Summer} + \gamma, \quad (2)$$

где: Q_{IV-IX} - объем стока за вегетационный период (апрель-сентябрь), P_{Winter} - сумма осадков за период с ноября по март, T_{Summer} - сумма температур воздуха за летний период.

На рис. 4 приведен график измеренных и рассчитанных расходов воды по уравнению (2) и полиномиальные тренды за многолетний период. Заметна хорошая сходимость трендов, однако в некоторые периоды наблюдается расхождение расчетных и измеренных расходов воды.

Значения коэффициентов множественной регрессии были получены в нормализованном виде (стандартизированная форма уравнения регрессии): $t_y = 0{,}609x_1 + 0{,}0118x_2$; коэффициент детерминации: $R^2 = 0{,}611^2 = 0{,}3733$.

Коэффициент регрессии в данном случае заметно мал. Это обстоятельство объясняется значительным превышением количества осадков в период апрель-июнь над количеством осадков в зимний период.

В работе [5] предложен способ представления обыкновенного дифференциального уравнения в виде разностной схемы на основе явной схемы Эйлера, а для расчетов предлагается использовать неявную схему. Для прогнозирования неявная схема не подходит, так как прогнозирование осадков и температуры на длительный период практически невозможно. В исследовании [4] это доказано на практическом материале и показано, что использование усредненных значений в качестве входных параметров также усредняет конечные результаты.

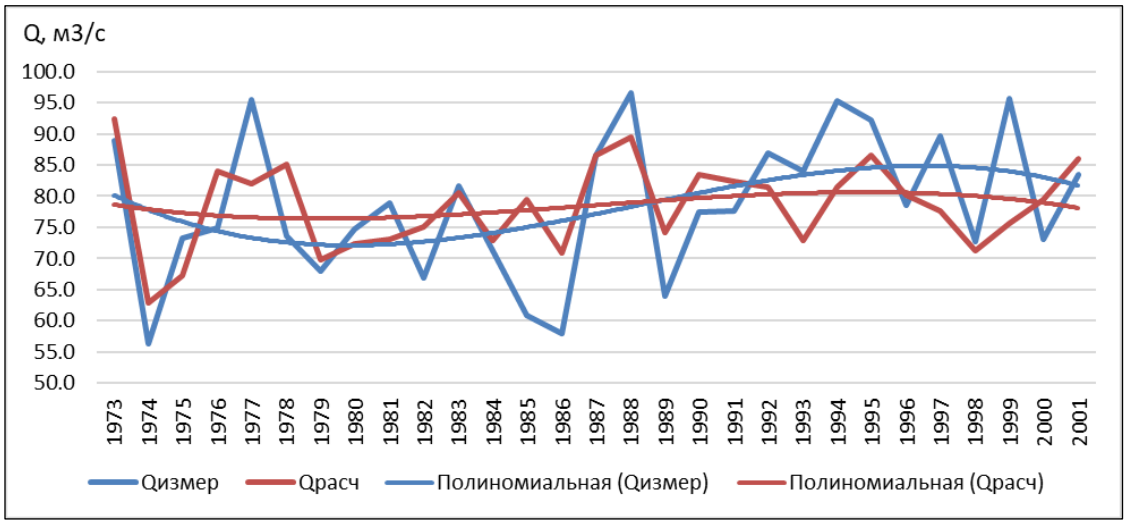


Рис. 4. Совмещенный гидрограф расходов воды за период вегетации и полиномиальные тренды для реки Шахимардан

Для моделирования речного стока использовалось уравнение водного баланса речного бассейна, которое было представлено явной схемой Эйлера для обыкновенных дифференциальных уравнений и в результате преобразований в упрощенном виде выглядит следующим образом:

$$Q^{t+1} = \alpha * Q^{t} + \tau * \beta * (\Sigma P - \Sigma R)^{t} \quad (3)$$

В уравнении: Q – расход воды в замыкающем створе на временном шаге «t» и «t+1», «ΣP» и «ΣR» – сумма приходных и расходных элементов водного баланса, зависящих от гидрометеорологических параметров, τ – временной шаг, «α» и «β» – коэффициенты, определяемые методом множественной регрессии.

Отметим, что в расчетной схеме отсутствует свободный член уравнения регрессии, поскольку его наличие при выполнении прогностических расчетов на период, приводит к накоплению значительной погрешности расчетов. Для нахождения коэффициентов уравнения регрессии использовались материалы наблюдений метеорологических станций в бассейне реки Шахимардан и гидрологического поста в замыкающем створе.

Факторный анализ. Факторный анализ — это статистический метод, используемый для описания изменчивости среди наблюдаемых, коррелированных переменных с точки зрения потенциально меньшего числа ненаблюдаемых переменных, называемых факторами. Например, возможно, что вариации в шести наблюдаемых переменных в основном отражают вариации в двух ненаблюдаемых (базовых) переменных.

Как указано в [3, 5], сток воды формируется под воздействием различных факторов; запишем это обстоятельство в виде модели:

$$Q_{river}^{t+1} = \alpha * Q_{river}^{t} + \beta * \sum_i P_i^t + \lambda * P^t + \gamma * T_{glacial}^t \quad (4)$$

где Q_{river}^{t+1} - расход воды на участке реки в момент времени t +1, Q_{river}^{t}- расход воды на участке реки за предыдущий момент времени, $\sum_i P$ - количество осадков за зимний период, P^t - осадки за предыдущее время, T^t - температура воздуха за предыдущий период времени. По построенному уравнению (4) определены коэффициенты множественной регрессии (α, β, λ, γ) для участка реки Шахимардан для различных месяцев периода вегетации (Таблица 1). Предложенный подход позволил разложить гидрограф сезонного половодья на две составляющие – снеговую и ледниковую.

Таблица 1

Стандартизированные уравнения и коэффициент регрессии
для стока реки Шахимардан по месяцам за период 1973-2024 годы

	Стандартизированная форма уравнения регрессии	Коэффициент детерминации
Апрель	$t_y = 0.875x_1 + 0.169x_2 + 0.104x_3$	$R^2 = 0.9057^2 = 0.8202$
Май	$t_y = 0.400x_1 + 0.333x_2 + 0.209x_3 + 0.370x_4$	$R^2 = 0.7458^2 = 0.5563$
Июнь	$t_y = 0.311x_1 + 0.164x_2 + 0.426x_3 + 0.443x_4$	$R^2 = 0.6545^2 = 0.4283$
Июль	$t_y = 0.420x_1 + 0.222x_2 + 0.602x_3 + 0.279x_4$	$R^2 = 0.7258^2 = 0.5268$
Август	$t_y = 0.721x_1 + 0.014x_2 + 0.230x_3 + 0.363x_4$	$R^2 = 0.8057^2 = 0.6492$
Сентябрь	$t_y = 0.856x_1 - 0.007x_2 - 0.036x_3 + 0.382x_4$	$R^2 = 0.8665^2 = 0.7509$

Примечание: t_y – расход воды, x_1- сток за предыдущий месяц, x_2- сумма осадков за зиму, x_3 - осадки, x_4- температура воздуха

Анализ коэффициентов стандартизированных уравнений регрессии показывает, что зависимость стока снижается к июню и затем повышается к сентябрю от расходов воды за предыдущий месяц (x_1). Зависимость от суммы зимних осадков (x_2) снижается от начала периода вегетации к его концу. Зависимость от осадков месяца (x_3) повышается до июля и снижается к сентябрю, причем в сентябре снижается значительно. Зависимость от температуры воздуха в бассейне (x_4) практически одинакова, с максимальным значением в июне.

Результаты и их обсуждение. Динамика коэффициентов регрессии ледникового стока объясняется уменьшением запасов водной составляющей ледников. Увеличение высоты нулевой изотермы в высокогорной зоне приводит не только к сокращению стока, но и позволяет предположить, что речной сток в большей степени будет определяться

режимом сезонных снегозапасов и в меньшей степени температурным режимом в летний период.

Определение вклада ледниковой составляющей позволяет выявить зависимость ледникового стока от температурного режима в бассейне реки Шахимардан. В различных бассейнах высокогорных рек вклад ледниковой составляющей колеблется от 10% до 30%.

Динамические изменения температурного режима воздуха приводят к изменению процессов абляции и таяния. При резком повышении температуры воздуха происходят процессы, повышающие снеговую линию и, следовательно, последующее резкое повышение температуры воздуха не приводит к увеличению ледниковой составляющей.

В бассейне реки Шахимардан наблюдаются различные значения ледникового стока в зависимости от сезонных климатических параметров. Увеличение зимних осадков и летних температур воздуха приводит к увеличению ледникового стока. Изменение осадков в сторону понижения и более низкие летние температуры воздуха приводят к уменьшению ледникового стока.

В связи с тем, что на таяние ледников, помимо температуры воздуха, влияет и количество солнечной радиации, достигающей поверхности ледника, снежный покров и ледники на северных склонах гор тают медленнее, чем на южных.

Выводы. В результате многофакторного анализа получены материалы, позволяющие сделать выводы о применимости метода нахождения объемов ледникового стока для бассейнов горных рек. Разделение на составляющие стока часто имеет комбинированный характер. В период, когда на склонах еще лежит снег, а температура воздуха уже положительная, происходит одновременное таяние как снега, так и льда на ледниках. В этот период снеговой и ледниковый стоки имеют комбинированное происхождение.

Динамика линии тренда ледникового стока (рис. 4) объясняется уменьшением запасов водной составляющей ледников. Увеличение высоты нулевой изотермы в высокогорной зоне приводит не только к сокращению стока, но и позволяет предположить, что речной сток в большей степени будет определяться режимом сезонных снегозапасов и в меньшей степени температурным режимом в летний период.

Динамические изменения температурного режима воздуха приводят к изменению процессов абляции и таяния. При резком повышении температуры воздуха происходят процессы, повышающие границу снеговой линии и последующее резкое повышение температуры воздуха не приводит к увеличению ледниковой составляющей.

Основная сложность распространения данной методики на другие территории заключается в том, что на северных склонах Алайского хребта с высокогорным оледенением отсутствуют метеорологические станции наблюдений. Во-первых, эти территории находятся на территории Кыргызстана, а сток рек используется в основном в Узбекистане. Это одна из основных проблем гидрологических прогнозов на трансграничных реках. Вторая проблема – это труднодоступность высокогорных метеорологических станций и высокая стоимость наблюдений.

Использованная литература:

1. Айзен В., Айзен Э., Кузьмичонок В. Ледники и гидрологические изменения в Тянь-Шане: моделирование и прогнозирование. 2007. Environmental Research Letters 2(4)045019. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045019

2. Вода и изменение климата (2020). ISBN 978-92-3-100371-4. ЮНЕСКО, 236 стр. www.unesco.org/water/wwap

3. Гавриленко Н.Н., Мягков С.В., Мягков С.С., Гофуров Т.К. Оценка ледникового стока в бассейне реки Сох графо-статистическим методом // Известия Географического общества Узбекистана. 2020. Т. 58. С. 225-231.

4. Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Пичура В.И. Оценка и прогнозирование стока малых рек в условиях антропогенного воздействия и изменения климата // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. Электронный доступ: https://science-education.ru/ru/article/view?id=7640 .

5. Меркулова Н. Н., Михайлов М.Д. Разностные схемы для обыкновенных дифференциальных уравнений. Томск, 2014. 122 с.

6. Мягков С.В., Мягков С.С., Хабибуллаев Ш.Х. Сток горных рек как индикатор изменения климата // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2022. № 3-4. С. 73-81.

7. Сагдеев Н.З., Акрамов И. Отдельные результаты мониторинга гидрологических постов Ферганской долины // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2024. № 1-2. С. 94-106.

8. Arnell N. (1999), *Climate change and global water resources. Global Environmental Change*, Washington, pp. 31-49.

9. Bliss, A, Hock, R and Radić, V (2014), Global response to glacier runoff to twenty-first century climate change, *J. Geophys. Res*., 119(4), pp. 717–730 (doi: 10.1002/2013jf002931)

10. Fillon RH, Williams DF (1984), Dynamics of meltwater discharge from Northern Hemisphere ice sheets during the last deglaciation, *Nature*, No.310. pp. 674–677.

11. Fujita, K (2008), Effect of precipitation seasonality on climatic sensitivity of glacier mass balance, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 276, pp. 14–19 (doi: 10.1016/j.epsl.2008.08.028)

12. Fujita, K and Nuimura, (2011), Spatially heterogeneous waste of Himalayan glaciers. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)*, 108 (34), pp. 14011–14014 (doi: 10.1073/pnas.1106242108)

13. Hirabayashi, Y, Döll, P and Kanae, S (2010) Global-scale modeling of glacier mass balances for water resource assessments: glacier mass changes between 1948 and 2006. *J. Hydrol.*, 390, pp. 245-256 (doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.001)

14. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry, OF Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 p.

15. Kaser, G, Großhauser, M and Marzeion, B (2010), Contribution of potential of glaciers to water availability in different climate regimes, *Proc. Natl Acad. Sci. USA (PNAS)*, 107 (47), pp. 20 223 – 20 227 (doi: 10.1073/pnas.1008162107)

16. Lins, H. F. (2012), USGS Hydro-Climatic Data Network 2009 (HCDN–2009): US Geological Survey Fact Sheet 2012–3047, 4 p., available only at https://pubs.usgs.gov/fs/2012/ 3047/.

17. Liu, S, Zhang, Y, Zhang, Y and Ding, Y (2009), Estimation of glacier runoff and future trends in the Yangtze River source region, China, *J. Glaciol.*, 55 (190), pp. 353-362 (doi: 10.3189/002214309788608778)

18. Mallakpour, I., Villarini G. (2015), The changing nature of flooding across the central United States, *Nature Climate Change*, No.5, pp. 250-254.

19. Rodriguez-Iturbe I. and Eagleson P.S. (1987), Mathematical Models of Rainstorm Events in Space and Time, *Water Resources Research*, No. 23, pp. 181-190.

20. Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., & Beniston, M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia), *Nature Climate Change*, 2(10), pp. 725-731.

21. Teller J. (2017), Volume and Routing of Late-Glacial Runoff from the Southern Laurentide Ice Sheet, Published online by Cambridge University Press.

References:

1. Aizen V., Aizen E. and Kuzmichonok V. (2007), Glaciers and hydrological changes in the Tien Shan: modeling and forecasting, *Environmental Research Letters 2 (4)*, 045019. doi: 10.1088 / 1748-9326 / 2/4/045019 (In Russ.).

2. *Water and Climate Change* (2020). ISBN 978-92-3-100371-4. UNESCO, 236 p. www.unesco.org/water/wwap (In Russ.).

3. Gavrilenko N. N., Myagkov S. V., Myagkov S. S., Gofurov T. K. (2020), Assessment of glacier runoff in the Sokh River basin using a graph-statistical method, *The Annales of the Geographical Society of Uzbekistan*, Vol. 58, pp. 225-231. (In Russ.).

4. Kuzmenko Ya.V., Lisetskiy F.N., Pichura V.I. (2012), Assessment and forecasting of small river runoff under anthropogenic impact and climate change, *Modern problems of science and education*, No. 6. Electronic access: https://science-education.ru/ru/article/view?id=7640. (In Russ.).

5. Merkulova N.N., Mikhailov M.D. (2014), *Difference schemes for ordinary differential equations*, Tomsk, 122 p. (In Russ.).

6. Myagkov S.V., Myagkov S.S., Khabibullaev Sh.Kh. (2022), Runoff of mountain rivers as an indicator of climate change, *Central Asian journal of geographical research*, No. 3-4, pp. 73-81. (In Russ.).

7. Sagdeev N.Z., Akramov I. (2024), Selected results of monitoring hydrological posts in the Fergana Valley, *Central Asian Journal of Geographical Research*, No. 1-2, pp. 94-106. (In Russ.).

8. Arnell N. (1999), *Climate change and global water resources. Global Environmental Change*, Washington, pp. 31-49.

9. Bliss, A, Hock, R and Radić, V (2014), Global response to glacier runoff to twenty-first century climate change, *J. Geophys. Res*., 119(4), pp. 717–730 (doi: 10.1002/2013jf002931)

10. Fillon RH, Williams DF (1984), Dynamics of meltwater discharge from Northern Hemisphere ice sheets during the last deglaciation, *Nature*, No.310. pp. 674–677.

11. Fujita, K (2008), Effect of precipitation seasonality on climatic sensitivity of glacier mass balance, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 276, pp. 14–19 (doi: 10.1016/j.epsl.2008.08.028)

12. Fujita, K and Nuimura, (2011), Spatially heterogeneous waste of Himalayan glaciers. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)*, 108 (34), pp. 14011–14014 (doi: 10.1073/pnas.1106242108)

13. Hirabayashi, Y, Döll, P and Kanae, S (2010) Global-scale modeling of glacier mass balances for water resource assessments: glacier mass changes between 1948 and 2006. *J. Hydrol.*, 390, pp. 245-256 (doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.001)

14. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry, OF Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 p.

15. Kaser, G, Großhauser, M and Marzeion, B (2010), Contribution of potential of glaciers to water availability in different climate regimes, *Proc. Natl Acad. Sci. USA (PNAS)*, 107 (47), pp. 20 223 – 20 227 (doi: 10.1073/pnas.1008162107)

16. Lins, H. F. (2012), USGS Hydro-Climatic Data Network 2009 (HCDN–2009): US Geological Survey Fact Sheet 2012–3047, 4 p., available only at https://pubs.usgs.gov/fs/2012/ 3047/.

17. Liu, S, Zhang, Y, Zhang, Y and Ding, Y (2009), Estimation of glacier runoff and future trends in the Yangtze River source region, China, *J. Glaciol.*, 55 (190), pp. 353-362 (doi: 10.3189/002214309788608778)

18. Mallakpour, I., Villarini G. (2015), The changing nature of flooding across the central United States, *Nature Climate Change*, No.5, pp. 250-254.

19. Rodriguez-Iturbe I. and Eagleson P.S. (1987), Mathematical Models of Rainstorm Events in Space and Time, *Water Resources Research*, No. 23, pp. 181-190.

20. Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., & Beniston, M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia), *Nature Climate Change*, 2(10), pp. 725-731.

21.Teller J. (2017), Volume and Routing of Late-Glacial Runoff from the Southern Laurentide Ice Sheet, Published online by Cambridge University Press.

Сведения об авторах:

Мягков Сергей Владимирович – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), доктор технических наук, профессор. E-mail: sergik1961@yahoo.com

Махмудов Бехруз Ботиржон угли – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), базовый (PhD) докторант

Дергачева Ирина Викторовна – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), доктор философии (PhD) по географическим наукам

Information about the authors:

Sergey Myagkov – Research Hydrometeorological Institute (Tashkent, Uzbekistan), Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: sergik1961@yahoo.com

Bekhruz Makhmudov – Research Hydrometeorological Institute (Tashkent, Uzbekistan), basic (PhD) doctoral student

Irina Dergacheva – Research Hydrometeorological Institute (Tashkent, Uzbekistan), PhD in Geography

Для цитирования:

Мягков С.В., Махмудов Б.Б., Дергачёва И.В. Анализ гидрологического режима реки Шахимардан графическим и регрессионным методами // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2025. № 3-4. С. 48-59.

For citation:

Myagkov S.V., Makhmudov B.B., Dergachyova I.V. (2025), Analysis of the hydrological regime of the Shakhimardan river by graphic and regression methods, *Central Asian Journal of Geographical Researches*, No. 3-4, pp. 48-59.