УДК 556.5 + 57.087 https://doi.org/10.5281/zenodo.14721249

Мягков С.В., Махмудов Б.Б., Хабибуллаев Ш.Х.

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Ташкент, Узбекистан

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕКИ СОХ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Аннотация. *Малые реки в Ферганской долине имеют важное значение для ведения водного хозяйства. Основным потребителем воды реки Сох остается орошаемое земледелие. Любые изменения, влияющие на водные ресурсы Центральной Азии, 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. 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 колеблется от 10% до 40%. Формула расчета может быть использована для прогнозирования доли ледникового стока в зависимости от изменения климата при известных климатических сценариях. Изменение климата изменяет речной сток и оказывает значительное влияние на жизнеобеспечение и окружающую среду. Нехватка пресноводных ресурсов увеличивает риски для чистой воды и санитарии.*

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

Myagkov S.V., Makhmudov B.B., Khabibullaev Sh.Kh.

Scientific Research Hydrometeorological Institute, Tashkent, Uzbekistan

HYDROLOGICAL REGIME OF THE SOKH RIVER UNDER CLIMATE CHANGE

Abstract. *Small rivers in the Fergana Valley are important for water management. Irrigated agriculture remains the main consumer of the Sokh River water. Any changes affecting the water resources of Central Asia have a high impact on various socio-economic sectors of development of 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 forecasting. The main concepts and theories underlying the study are presented. Based on the mathematical model of the formation of mountain river runoff, an analysis of the multifactorial dependence was carried out and the volume of glacial runoff was 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 obtained showed that, depending on the climate parameters of the current year, the share of glacial runoff fluctuates from 10% to 40%. The calculation formula can be used to predict the share of glacial runoff depending on climate change under known climate scenarios. Climate change alters river runoff and has a significant impact on life support and the environment. Lack of freshwater resources increases the risks for clean water and sanitation.*

Key words: *river runoff, climate change, runoff components, multiple regression, hydrological calculations, glacial runoff, precipitation, hydrology.*

Введение и постановка проблемы. Изменение климата на планете оценивается по изменению температуры приземного слоя воздуха на метеорологических станциях и выпадению осадков на поверхность. Температура воздуха определяет таяние ледников. Осадки определяют снежный покров в бассейне реки и пополняют объем ледникового покрова.

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

По источникам питания реки Средней Азии делятся на 4 типа. Реки, питающиеся талыми водами ледников и снегов горных систем Тянь-Шаня и Памира, с летним половодьем. Реки, питающиеся снеговыми и отчасти ледниковыми водами, половодье происходит в мае-июле. Реки, питающиеся талыми водами сезонных и многолетних снежников, половодье происходит весной. Реки, питающиеся сезонными дождями, талыми водами снега, в основном малые и маловодные реки. При выпадении обильных осадков возникают половодья, затапливающие территории выше поймы.

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.

Изученность вопроса. 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 Аральского моря (бассейны рек Сырдарья и Амударья) 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] отмечается, 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 и экономической активности, особенно в городских районах, а также изменение моделей 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 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 Земли 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 стресс подземных вод (хотя обычно менее выраженное, чем для поверхностных вод, и замедленное) 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, включая, помимо прочего, землепользование и изменение растительного покрова, регулирование водных ресурсов и системы забора воды, а также загрязнение воды. Изменение климата влияет на водный цикл суши 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 там 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].

Материалы и методы. Для исследования был выбран бассейн реки Сох, бассейн реки расположен на северных склонах Алайского хребта. Река Сох является трансграничным речным бассейном, расположенным на территории Узбекистана и Кыргызстана (Рис.1). Ледниковая зона расположена на территории Кыргызстана, основная часть стока реки Сох используется на орошение в Узбекистане. На территории бассейна реки имеется только одна метеорологическая станция. Климатические наблюдения там ведутся с 1932 года. На реке также имеется гидрологический пост.



Рис. 1. Алайский хребет, часть Ферганской долины, бассейны рек Сох и Шахимардан

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

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.

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).

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

где: $Q_{April-September}$ - 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.

Значения коэффициентов множественной регрессии были получены в нормализованном виде (стандартизированная форма уравнения регрессии): $t_y = 0{,}393x_1 + 0{,}391x_2$; коэффициент детерминации: $R^2 = 0{,}55842 = 0{,}3118$.

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.

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 окончательном и 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 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 определены коэффициенты множественной регрессии (α, β, λ, γ) для участка реки Сох (пост Сарыканда) для различных месяцев года.

Результаты и их обсуждение. Предложенный подход позволил разложить гидрограф сезонного половодья на две составляющие – снеговую и ледниковую.

Долгосрочные тенденции ледниковой составляющей стока показывают рост с 1970 по 1986 год и снижение с конца 1980-х годов по настоящее время.

На рис. 2 показаны гидрографы расходов воды в створе Сарыканда (измеренные, расчетные и линия тренда). Линия тренда показывает, что расходы воды увеличиваются в период 1973-2003 гг., а затем наступает период стабилизации. Это объясняется тем, что происходит таяние и расходы воды увеличиваются. Затем объемы ледников, подлежащих таянию, уменьшаются и таяние замедляется.

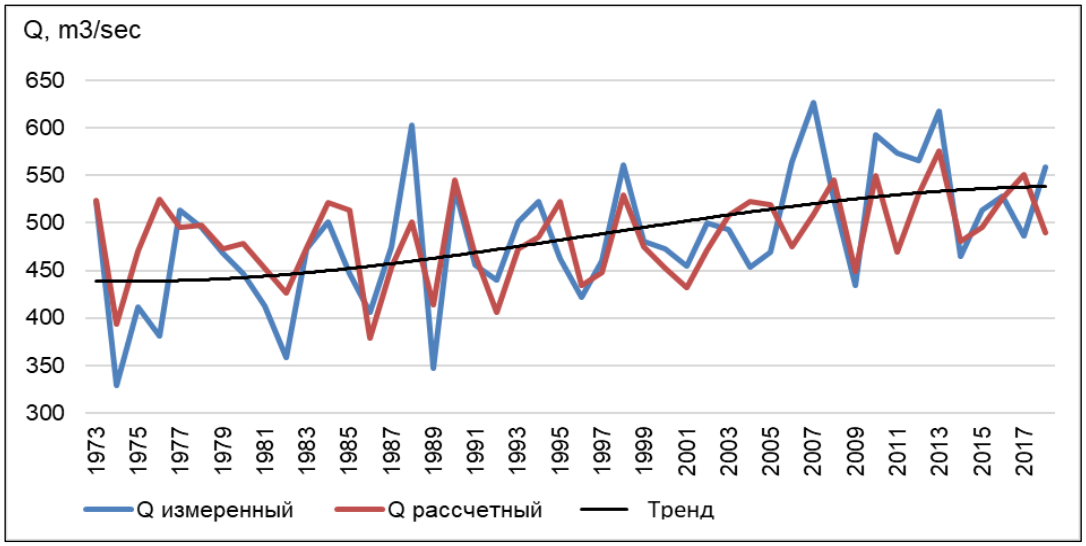


Рис. 2. Гидрограф, измеренный и рассчитанный сток реки Сох за многолетний период

На рис. 3 показан совместный ход расхода воды, осадков и температуры воздуха на станции Сарыканда. Различия в трендах осадков и температуры воздуха заметны. В одних случаях осадки и температура дают результирующий вклад в сток, увеличивая его объем, а в других играют противоположные роли. Таким образом, совместный вклад изменяет расход воды в реке.

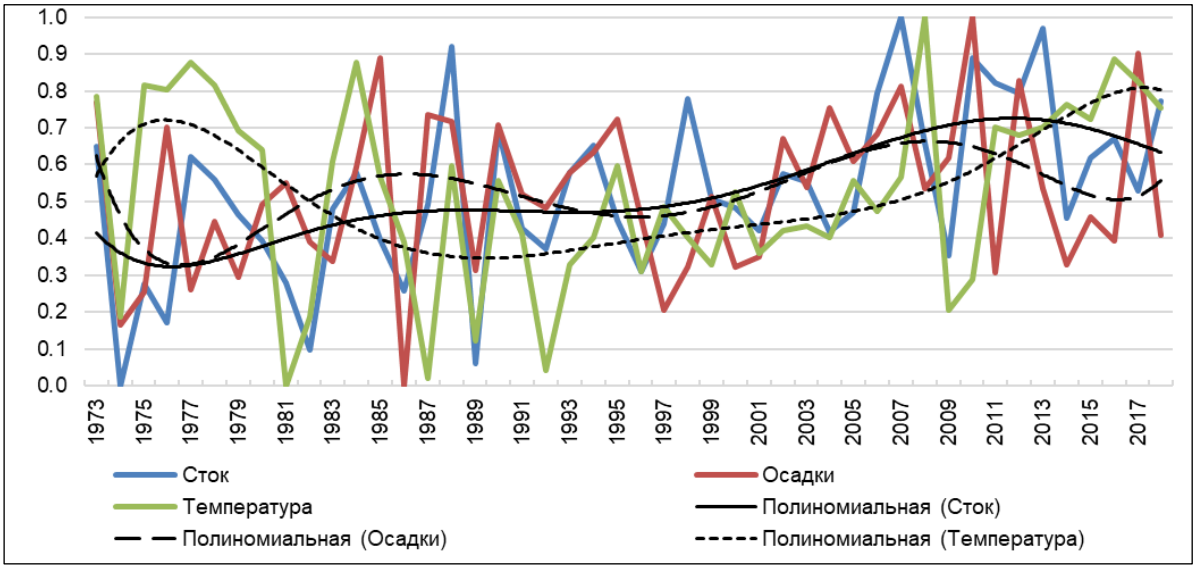


Рис. 3. График изменения стока рек, осадков и температуры воздуха в бассейне реки Сох за многолетний период

Примечание: на рисунке показаны полиномиальные тренды. Данные нормализованы (0 ≤ Данные ≤ 1)

Динамика линии тренда 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. В различных бассейнах высокогорных рек вклад ледниковой составляющей колеблется от 10% до 30%.

На основе статистических расчетов получено эмпирическое уравнение для расчета объема ледникового стока для бассейнов горных рек:

$$Q_{\text{ледниковый сток}} = -0{,}0008 * T^2 + 1{,}2172 * T + 92{,}8 , \qquad (5)$$

коэффициент регрессии $R^2 = 0{,}4324$, коэффициент корреляции К=0,66.

Это уравнение и методологический подход можно использовать для оценки ледникового стока в условиях изменения климата.

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 Сох 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. За период наблюдений (1930-2020 гг.) в целом наблюдается увеличение доли ледникового стока, что привело к уменьшению площади оледенения в высокогорной зоне Алайского хребта.

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

Выводы. В результате факторного анализа получены материалы, позволяющие сделать выводы о применимости метода нахождения объемов ледникового стока в горных районах. 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 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 снеговую линию и, следовательно, 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. и Кузьмичонок В. Ледники и гидрологические изменения в Тянь-Шане: моделирование и прогнозирование. Environmental Research Letters. 2007. 2(4)045019. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045019

2. Вода и изменение климата. ISBN 978-92-3-100371-4. ЮНЕСКО, 2020. 236 с. 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), 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, 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), 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), 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), 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), 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. URL: 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 researches*, 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 Researches*, 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), 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, 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), 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), 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), 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), 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.

Хабибуллаев Шерзод Хабибуллахужаевич – Узгидромет (Ташкент, Узбекистан), базовый (PhD) докторант.

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), basical doctoral (PhD) student.

Sherzod Khabibullaev – Uzhydromet (Tashkent, Uzbekistan), basical doctoral (PhD) student.

Для цитирования:

Мягков С.В., Махмудов Б.Б., Хабибуллаев Ш.Х. Гидрологический режим реки Сох в условиях изменения климата // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2024. №. 3-4. С. 91-100.

For citation:

Myagkov S.V., Makhmudov B.B., Khabibullaev Sh.Kh. (2024), Hydrological regime of the Sokh river under climate change, *Central Asian Journal of Geographical Research*, No. 3-4, pp. 91-100. (In Russ.).