



ВЕРОЯТНОСТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА РЕК В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ БАССЕЙНА РЕКИ ЗЕРАВШАН

Мирзоев В. А., Гайдукова Е. В. ORCID ID 0000-0002-3547-5538,
Батмазова А. А. ORCID ID 0000-0002-9135-4925

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный гидрометеорологический университет», Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: oderiut@mail.ru*

В данной статье рассматривается проблема совершенствования методов прогнозирования речного стока в условиях изменения климата и возрастающей антропогенной нагрузки на водные ресурсы. Представлены результаты применения вероятностного подхода, основанного на уравнении Фоккера – Планка – Колмогорова и методе моментов, для оценки и прогноза стока рек водосбора р. Зеравшан (Узбекистан). Исходные данные включали метеорологические наблюдения (8 станций) и гидрологические данные (14 гидрологических постов) в бассейне р. Зеравшан. Климатические прогнозы до 2050 г. были получены с использованием шести моделей Шестого доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата для трех климатических сценариев. Были выполнены две серии статистических расчетов стока – без учета антропогенной нагрузки и с учетом ее в модели. Показано, что учет антропогенной нагрузки в модели позволяет получить корректные прогнозные значения коэффициентов вариации, тогда как без такого учета отклонения достигают необоснованных значений. Полученные результаты могут быть использованы для планирования режимов водопользования в условиях нестационарного климата и разработки мер перспективной адаптации рек бассейна Зеравшан. Предложенная методология может быть рекомендована для других антропогенно нагруженных речных бассейнов в засушливых зонах.

Ключевые слова: река Зеравшан, изменение климата, климатические сценарии, вероятностный подход, антропогенная нагрузка

PROBABILISTIC FORECASTING OF RIVER RUNOFF UNDER CLIMATE CHANGE AND ANTHROPOGENIC LOAD FOR THE ZERAVSHAN RIVER BASIN

Mirzoev V. A., Gaydukova E. V. ORCID ID 0000-0002-3547-5538,
Batmazova A. A. ORCID ID 0000-0002-9135-4925

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Russian State Hydrometeorological University”, Saint Petersburg,
Russian Federation, e-mail oderiut@mail.ru*

This article presents methods for forecasting river flow in the context of climate change and increasing anthropogenic load on water resources. The article presents the results of the development of a probabilistic probability model based on the Fokker–Planck–Kolmogorov equation and the method of moments for assessing and forecasting river runoff in the Zeravshan River catchment area (Uzbekistan). The initial data were obtained from meteorological observations at eight stations and hydrological data from fourteen hydrological posts in the Zeravshan River basin. Climate forecasts up to 2050 were obtained using six models from the Sixth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change for three climate scenarios. Two series of statistical runoff calculations were performed: without taking into account the anthropogenic load in the models and with it in mind. It is shown that taking into account the anthropogenic load in the models allows obtaining correct predicted values of the variation coefficients, whereas without such consideration of compliance with the requirements, unfounded results are obtained. The results obtained can be used to plan water use regimes under unstable climate conditions and develop measures for progressive adaptation of the Zeravshan River basin. The proposed methodology may be preferable for other anthropogenically stressed river basins in arid zones.

Keywords: Zeravshan River, climate change, climate scenarios, probabilistic approach, anthropogenic load

Введение

Управление водными ресурсами в условиях изменяющегося климата и высокой антропогенной нагрузки является одной из острых проблем бассейна р. Зеравшан и Узбекистана в целом [1]. Как показывают исследования, страна сталкивается с такими вызовами, как таяние ледников, изменение

режима осадков и рост температур, что требует совершенствования методов анализа и прогноза природных процессов [2].

На региональном уровне анализ гидрометеорологической изученности бассейна р. Зеравшан подтверждает наличие значимых трендов повышения температуры воздуха, в то время как ряды осадков и стока

статистически значимых трендов не имеют, что указывает на сложность и нелинейность происходящих изменений [3, 4]. Детальное изучение режима выпадения осадков в бассейне Среднего Зеравшана показывает их критическую роль как приходной части водного баланса, при этом выявлена их высокая пространственно-временная изменчивость и наличие экстремальных засушливых и многоводных периодов, что напрямую влияет на водообеспеченность территории [5, 6]. Оценка водного баланса всего водосбора свидетельствует о том, что расходная часть (сток и испарение) систематически превышает приходную (осадки), а отрицательная невязка баланса количественно характеризует высокую антропогенную нагрузку, связанную с изъятием воды на ирригацию, промышленные и коммунально-бытовые нужды, которая компенсируется, предположительно, за счет использования грунтовых вод [3]. Эта нагрузка усугубляется климатическими изменениями, которые ведут к увеличению частоты экстремальных засух и наводнений, напрямую влияя на устойчивость сельского хозяйства и водоснабжение [7]. На примере хлопководства доказана прямая экономическая зависимость аграрного сектора от доступных объемов воды: моделирование производственной функции показало, что изменение водообеспеченности приводит к пропорциональному изменению урожайности и чистой прибыли, что позволяет выделить зоны, наиболее благоприятные и, наоборот, рискованные для ведения сельского хозяйства с точки зрения водообеспеченности [8].

Совокупность этих результатов подтверждает, что регион испытывает некоторый дефицит в водных ресурсах. Приведенные выше оценки в основном являются ретроспективными. Для обоснования перспективных режимов водопользования необходим переход к сценарному прогнозированию на основе климатических моделей [9, 10].

Цель исследования – анализ эффективности вероятностного метода прогнозирования речного стока с учетом антропогенной нагрузки на речном водосборе с приме-

нением различных климатических сценариев на примере р. Зеравшан.

Материалы и методы исследования

Одной из задач для апробации вероятностного подхода и климатических сценариев является оценка составляющих водного баланса. Она была проведена в исследовании [3] с использованием суммы годовых осадков, среднегодовой температуры воздуха и среднегодовых расходов воды. Метеорологическая информация бралась за период с 2000 по 2022 г., гидрологическая – за период с 2009 по 2023 г. В исследовании использовались данные по следующим метеорологическим постам: Самарканд, Булунгур, Янгиарык, Пайарык, Окдарье, Нурабад, Кашрабад, Каттакурган. Данные о расходах воды бассейна р. Зеравшан брались по постам, расположенным как на естественных, так и на зарегулированных – в основном на малых и средних – водотоках: 1 – р. Акдарья – кишл. Агалык; 2 – р. Ургутсай – г. Ургут; 3 – р. Аманкутансай – кишл. Аманкутан; 4 – р. Бахмазарсай – кишл. Бахмазар; 5 – р. Биглярсай – кишл. Янги-Акчаб; 6 – р. Зеравшан – Даргомская плотина; 7 – кан. Обводной – Голова, из кан. Даргом; 8 – кан. Правобережный – Голова; 9 – р. Зеравшан – Ак-Карадарьинский вододелитель; 10 – кан. Центральный Мианкальский – Голова, из р. Зеравшан; 11 – кан. Курбанобад – Голова, из р. Зеравшан; 12 – кан. Подводящий Каттакурганского вдхр. – Устье; 13 – кан. Чегонак – голова, из кан. Отводящего; 14 – р. Зеравшан – г. Навои.

На рис. 1 показано расположение метеорологических станций и гидрологических постов бассейна р. Зеравшан.

Метод оценивания водных ресурсов на территориях с высокой антропогенной нагрузкой в условиях изменения климата основан на применении вероятностного подхода. Этот подход заключается в статистическом моделировании гидрологических процессов посредством уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК) и метода моментов [11].

Уравнение ФПК описывает эволюцию плотности вероятности $p(Q, t)$:

$$\frac{\partial p(Q, t)}{\partial t} = - \frac{\partial [A(Q, t)p(Q, t)]}{\partial Q} + 0,5 \frac{\partial^2 [B(Q, t)p(Q, t)]}{\partial Q^2}, \quad (1)$$

где A и B – коэффициенты сноса и диффузии, определяющиеся физико-статистическими параметрами.

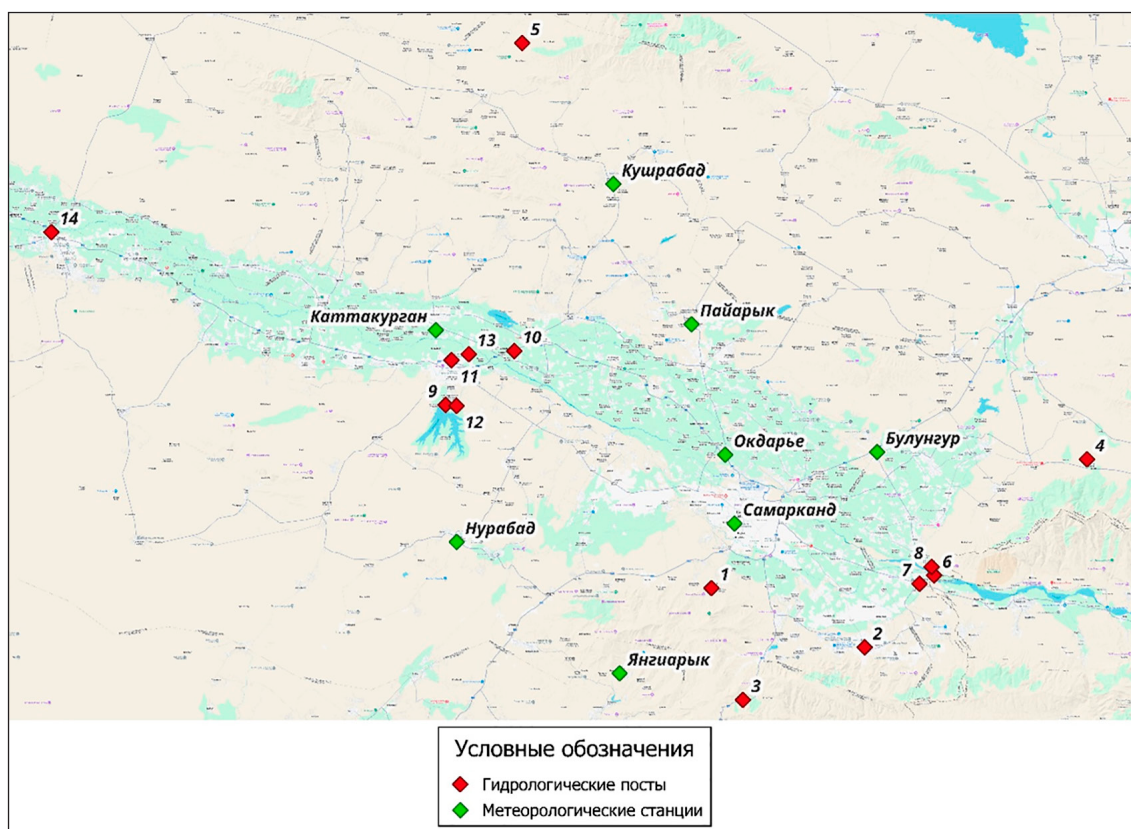


Рис. 1. Карта-схема района исследований

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

На практике пользуются тремя-четырьмя моментами вероятностных распределений, и тогда уравнение (1) аппроксимируется системой дифференциальных уравнений для моментов:

$$\frac{dm_1}{dt} = -(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})m_1 - 0,5G_{\bar{c}\bar{N}} + \bar{N}, \quad (2)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = -2(\bar{c} - G_{\bar{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\bar{c}\bar{N}}m_1 + G_{\bar{N}},$$

$$\frac{dm_3}{dt} = -3(\bar{c} - 1,5G_{\bar{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\bar{c}\bar{N}}m_2 + 3G_{\bar{N}}m_1,$$

$$\frac{dm_4}{dt} = -4(\bar{c} - 2G_{\bar{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\bar{c}\bar{N}}m_3 + 6G_{\bar{N}}m_2.$$

Этой системы уравнений достаточно для определения всех расчетных гидрологических характеристик. Решение прогностической задачи разбивается на два этапа: по имеющимся норме стока, коэффициентам вариации и асимметрии находятся значения моментов m_i и по ним вычисляются $\bar{n}$, $\bar{N}$, $G_{\bar{c}}$, $G_{\bar{N}}$, $G_{\bar{c}\bar{N}}$. Затем, меняя в соответствии с климатическим сценарием значения $c(X, T)$ и $N(X)$, находятся прогнозные значения моментов $m_i^{пр}$. По ним вычисляют-

ся прогнозные расчетные характеристики, строятся прогнозные распределения $p^{пр}(Q)$ и находятся обеспеченные значения $Q_{P\%}^{пр}$, отличающиеся от фактических учетом климатических изменений.

Вероятностный метод для бассейна р. Зеравшан был скорректирован таким образом, чтобы учесть влияние антропогенной деятельности в условиях климатических изменений. Суть адаптации состоит в модификации расчетной формулы прогнозируемых

осадков $X_{\text{пр+антр.}}$. Это достигается путем добавления к прогнозируемому значению невязки δ и вычитания погрешности ε , которые вычисляются по уравнению водного баланса для каждого водосбора отдельно [3]:

$$X_{\text{пр+антр.}} = X_{\text{пр}} + \delta - \varepsilon.$$

По Шестому оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [12] были отобраны различные модели и сценарии для прогноза сумм годовых осадков и среднегодовой температуры для перечисленных метеорологических станций на 2050 г. В табл. 1 представлены климатические модели и их описание.

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью прогнозных значений температур воздуха ($T_{\text{пр}}$) и атмосферных осадков ($X_{\text{пр}}$) для каждой модели, представлен-

ной в табл. 1, производится расчет по формуле А. Н. Постникова испаряемости (E_0) и испарения ($E_{\text{пр}}$) по формуле П. Шрайбера. Пример расчета представлен в табл. 2 для метеорологической станции Булунгур.

Анализируя табл. 1 и графики на рис. 2, можно заключить следующее: наиболее высокие средние годовые температуры ожидаются по модели Amon_CanESM5, климатический сценарий SSP5-8.5, тогда как наилучший сценарий демонстрирует модель Amon_GISS-E2-1-G (SSP1-2.6). Максимальные суммы годовых осадков характерны для модели Amon_GISS-E2-1-G при реализации сценария SSP3-7.0, минимальные – для модели Amon_CanESM5 с вариантом развития SSP1-2.6. Средняя ожидаемая величина повышения температуры составит около 1,7 °C для бассейна р. Зеравшан, что согласуется с выводами Шестого оценочного доклада МГЭИК.

Таблица 1

Климатические модели и их описание

№	Название модели	Описание
1	Amon_GISS-E2-1-G_ssp5-8.5_gn_201501-205012	Сценарий с очень высоким выбросом парниковых газов: выбросы CO ₂ утроятся к 2075 г., а глобальная температура увеличится на 1,9–3,0 °C
2	Amon_CanESM5_ssp5-8.5_gn_201501-210012	
3	Amon_CESM2-WACCM_ssp5-8.5_gn_201501-210012	
4	Amon_GISS-E2-1-G_ssp3-7.0_gn_201501-205012	Сценарий с высокими выбросами парниковых газов: выбросы CO ₂ удвоятся к 2100 г., а глобальная температура увеличится на 1,7–2,6 °C
5	Amon_CanESM5_ssp3-7.0(1)_gn_201501-210012	
6	Amon_CanESM5_ssp3-7.0_gn_201501-210012	
7	Amon_GISS-E2-1-G_ssp1-2.6_gn_201501-205012	Сценарий с низким уровнем выбросов парниковых газов: выбросы CO ₂ сократятся до 0 примерно к 2075 г., а глобальная температура увеличится на 1,3–2,2 °C
8	Amon_CanESM5_ssp1-2.6_gn_201501-210012	

Примечание: составлена авторами на основе источника [12].

Таблица 2

Расчет испарения и испаряемости по климатическим моделям (метеостанция Булунгур)

№	Название модели	$T_{\text{пр}}$, °C	$X_{\text{пр}}$, мм	E_0 , мм	$E_{\text{пр}}$, мм
1	Amon_GISS-E2-1-G_ssp585_gn_201501-205012	16,6	239	1408	237
2	Amon_GISS-E2-1-G_ssp370_gn_201501-205012	16,2	291	1365	287
3	Amon_GISS-E2-1-G_ssp126_gn_201501-205012	14,7	235	1208	233
4	Amon_CanESM5_ssp370(1)_gn_201501-210012	18,3	191	1615	190
5	Amon_CanESM5_ssp370_gn_201501-210012	18,2	186	1614	185
6	Amon_CanESM5_ssp585_gn_201501-210012	19,7	235	1823	234
7	Amon_CanESM5_ssp126_gn_201501-210012	16,5	179	1394	178
8	Amon_CESM2-WACCM_ssp585_gn_201501-210012	17,8	264	1557	262

Примечание: составлена авторами на основе источника [12] и полученных данных в ходе исследования.

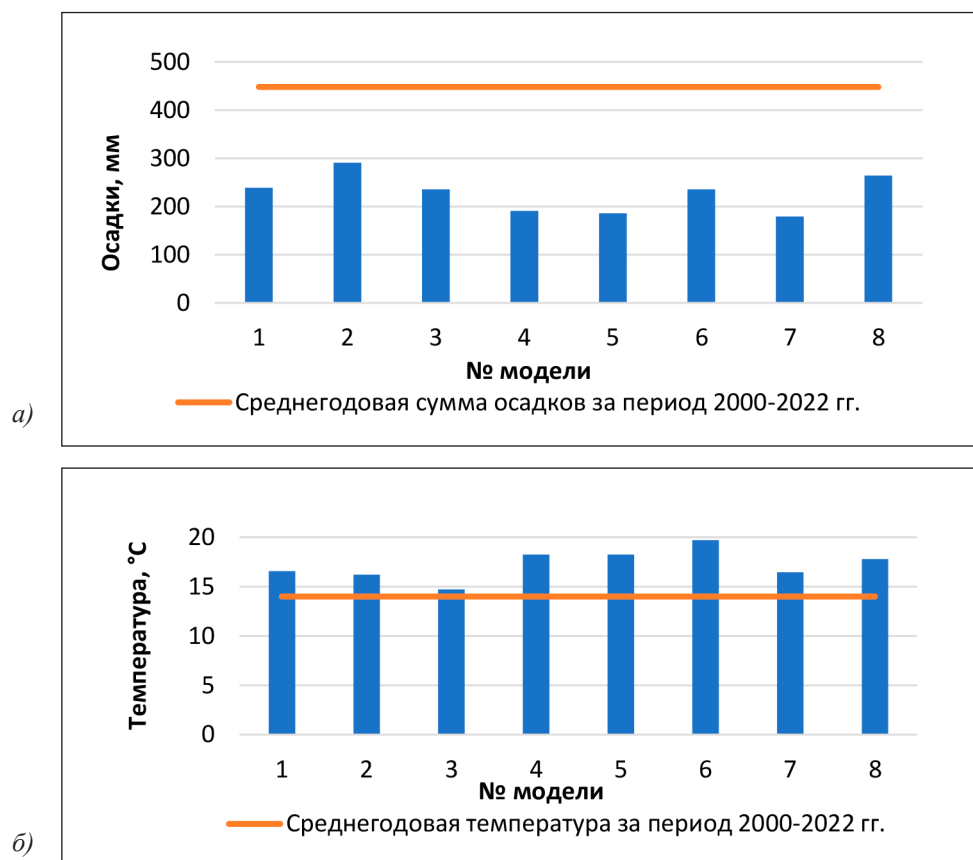


Рис. 2. Ожидаемые изменения сумм годовых осадков (а) и температуры воздуха (б) по различным моделям и сценариям для метеостанции Булунгур
Примечание: составлена авторами на основе источника [12]

Таблица 3

Расчет и сценарная оценка характеристик без антропогенной нагрузки

Река – пост	Р. Акдарья – кишл. Агалык	Р. Ургутсай – г. Ургут	Р. Бахмазарсай – кишл. Бахмазар	Р. Зеравшан – г. Навои
Параметр				
Q , м ³ /с	1,79	0,49	0,48	19,50
T , °C	13,8	15,0	15,0	15,0
T_{np} , °C	17,5	17,2	17,2	17,2
X , мм	378	348	348	331
X_{np} , мм	210	253	253	230
Cv	0,50	0,44	0,41	0,23
Cv_{np}	10,55	6,05	4,16	2,12
Cv , %	–1989	–1286	–926	–813
m_{np} , мм	0,01	0,00	0,01	0,32
m_{np} , %	99,59	99,29	98,70	98,35

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В табл. 3 и 4 приведен результат применения вероятностного подхода с учетом климатических изменений, продиктованных сценарием Amon_GISS-E2-1-G_ssp585_gn_201501-205012, для прогноза стока некоторых рек бассейна Зеравшана и оценка статистических параметров без учета антропогенной нагрузки и с ее учетом.

Таблица 4

Расчет и сценарная оценка характеристик с антропогенной нагрузкой

Река – пост Параметр	Р. Акдарья – кишл. Агалык	Р. Ургутсай – г. Ургут	Р. Бахмазарсай – кишл. Бахмазар	Р. Зеравшан – г. Навои
Q , м ³ /с	1,79	0,49	0,48	19,50
T , °C	13,8	15,0	15,0	15,0
T_{np} , °C	17,3	16,6	16,6	16,6
X , мм	1083	898	622	552
X_{np} , мм	920	789	513	443
Cv	0,50	0,44	0,41	0,23
Cv_{np}	0,58	0,50	0,50	0,30
Cv , %	-14,8	-13,39	-22,54	-27,99
m_{np} , мм	1,59	0,44	0,39	15,01
m_{np} , %	10,66	11,46	19,22	23,89

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Видно, что рассчитанные коэффициенты вариации без учета влияния антропогенной нагрузки характеризуются существенными отклонениями (табл. 3). Однако вариант расчета с учетом антропогенного фактора показывает приемлемые значения этих показателей (табл. 4).

Подобная тенденция наблюдается и при оценке нормы годового стока. Объяснить это можно, например, тем, что без учета антропогенной нагрузки модель учитывает только естественные, климатические флуктуации. Антропогенная нагрузка (например, регулирование стока, водозабор, сбросы) изменяет структуру шума, подавляя естественную хаотичность системы. Это и соответствует правильной адаптации метода к антропогенно нагруженной территории при изменении климата.

Предлагаемый метод рекомендуется применять на прочих водосборных бассейнах аридной зоны, испытывающих значительную антропогенную нагрузку, при разработке рациональных схем водопользования в условиях меняющегося климата [13–15].

Заключение

В результате проведенного исследования выполнена апробация вероятностного подхода на основе уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова для прогноза стока рек бассейна Зеравшана с учетом климатических изменений и антропогенной нагрузки. Анализ климатических проекций по шести моделям CMIP6 для трех сценариев (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5) показал, что к 2050 г. среднегодовая температура

на водосборе повысится в среднем на 1,7 °C, что согласуется с выводами Шестого оценочного доклада МГЭИК. При этом наибольший разброс сценариев наблюдается для сумм годовых осадков: от существенного сокращения (модель Amon_CanESM5, SSP1-2.6) до локальных увеличений (модель Amon_GISS-E2-1-G, SSP3-7.0).

Расчеты статистических характеристик стока для четырех створов подтвердили критическую важность учета антропогенной нагрузки в прогнозных моделях. В варианте без учета антропогенного фактора прогнозные значения коэффициентов вариации оказались физически некорректными, достигая 4–10 при фактических значениях 0,2–0,5, а отклонения нормы стока составили более 98 %. При включении в модель антропогенной составляющей прогнозные значения коэффициентов вариации вошли в диапазон 0,30–0,58, что соответствует допустимым значениям для рек региона, а снижение нормы стока составило от 10 до 24 %.

Выполненные исследования подтверждают, что вероятностный подход, дополненный учетом антропогенной нагрузки, позволяет получать физически корректные прогнозные оценки стока рек. Методика может быть рекомендована для применения на других антропогенно-нагруженных водосборах аридной зоны при обосновании перспективных режимов водопользования в условиях изменяющегося климата.

Список литературы

1. Xikmatov F. X. Hydrological regime and water resources of rivers of the Zerafshan basin under climate change // Ori-

ental Journal of Social Sciences. 2024. Vol. 1 (01). P. 1–236. DOI: 10.37547/supsci-conf-01.

2. Мирзоев В., Гайдукова Е. В. Актуальные проблемы анализа и прогноза природных процессов в Узбекистане // Метеорология без границ. Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. 2025. С. 26–27. EDN: U1XBYT.

3. Мирзоев В. А., Гайдукова Е. В., Семенова Е. К. и др. Оценка водного баланса на антропогенно-нагруженном водосборе реки Зеравшан (Узбекистан) // Proceedings of the Yerevan State University, Geology and Geography. 2025. Vol. 59. Is. 2 (266). P. 412–419. DOI: 10.46991/pysuc.2025.59.2.412.

4. Норматов И. Ш., Шарофзода Ф. А., Норматов П. И., Ашуров М. Пространственное распределение метеорологических условий бассейна реки Зеравшан и их корреляция со стоком реки Зеравшан // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 3 (389). С. 125–138. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-3-125-138.

5. Ниязов Д. Б., Калашникова О. Ю., Мирзохонова С. О. Прогноз стока реки Зеравшан в период половодья по данным наземных наблюдений // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2020. Т. 20. № 8. С. 105–110. EDN: GVYAAI.

6. Мирзоев В. А., Гайдукова Е. В. Атмосферные осадки как приходная часть водного баланса среднего Зеравшана // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (Иркутск, 2024). Иркутский государственный университет. 2024. С. 149–153. EDN: VDDWLM.

7. Мирзоев В. А., Гайдукова Е. В. Изменения климата и окружающей среды в бассейне реки Зеравшан (Узбекистан) // Системы контроля окружающей среды – 2024: Доклады Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук в рамках научно-технического сотрудничества Россия-АСЕАН-БРИКС. Севастополь: ИП Куликов А. С., 2024. С. 88. EDN: MDPIRM.

8. Мирзоев В. А., Тихонова А. М., Гайдукова Е. В. Учет водных ресурсов в производственной функции хлопковод-

ства Узбекистана // Инженерная гидрология – 2025: Коллективная монография по материалам международной конференции. Казань: ООО «Бук», 2025. С. 84–87. EDN: VDRDFC.

9. Climate Change and Hydrology in Central Asia: A Survey of Selected River Basins // Regional Environmental Centre for Central Asia. 2019. URL: <https://zoinet.org/wp-content/uploads/2018/01/Climate-Hydrology-CA-Final-WEB.pdf> (дата обращения: 23.10.2025).

10. Олимов К. З., Саидов И. И. Методика и методология по разработке бассейнового плана по управлению водными ресурсами реки Зеравшан // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 2019. № 3 (176). С. 101–111. EDN: LBCJQI.

11. Коваленко В. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В., Громова М. Н., Хаустов В. А. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате. СПб.: Издательство ПИТМУ, 2010. 51 с. ISBN 978-5-86813-276-6. EDN: RYRVGJ.

12. IPCC Sixth Assessment Report [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (дата обращения: 01.05.2025).

13. Концепция развития водного хозяйства на 2020–2030 годы / Указ президента Узбекистана // Министерство водного хозяйства республики Каракалпакстан. [Электронный ресурс]. URL: <https://krminwater.uz/ru/19/02/2020/73/> (дата обращения: 08.01.2025).

14. Обобщающий отчет «Водосбережение в странах Центральной Азии: Опыт прошлого и ориентиры на будущее» // Рабочая группа МКВК по направлению «Водосбережение». URL: <http://icwc-aral.uz/pdf/synthesis-report-watersaving.pdf> (дата обращения: 19.10.2024).

15. Хайдаров А. Использование водных ресурсов узбекистанского сегмента бассейна реки Зеравшан: аналитический обзор // Центральноеазиатский журнал исследований водных ресурсов. 2020. № 6 (2). С. 48–64. DOI: 10.29258/sajwr/2020-r1.v6-2/48-64.rus.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.