

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ HBV-ЕНТ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОКА РЕКИ ФАНДАРЬЯ НА ПЕРИОД ДО 2080 ГОДА

Ниязов Дж.Б.

*Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии
Национальной академии наук Таджикистана*

Аннотация: Гидрологическая модель HBV3-ЕНТ9 успешно применяется для горных рек со значительной площадью оледенения. В данном исследовании она применена для бассейна реки Фандарья, где на основе климатических проекций CMIP5 RCP4.5 и RCP8.5, были рассчитаны сценарии изменения водных ресурсов до 2080 года. К 2080 году в соответствии с климатическим сценарием RCP 4.5 отклонение годовой температуры воздуха составит 2,3 оС, а годовая сумма осадков составит 98-109 % нормы, в связи с чем, ожидается повышение водности на 23 % от нормы. По сценарию RCP 8.5 отклонение годовой температуры воздуха составит 4,3 оС, а годовая сумма осадков составит 101-110 % нормы и водность реки Фандарья повысится на 36 % от нормы. Внутри года, ожидается увеличение температуры воздуха во все месяцы. Месячное количество осадков значительно повысится в январе и декабре – на 30- 95 % от нормы, а в июне в 1,5-2,5 раза от значений за 2006-2018 гг. В связи с этим, во внутригодовом распределении стока ожидается прохождение двух пиков паводков в июне и июле. Увеличение водности в весенние месяцы будет способствовать усилению селевой и паводковой активности.

Ключевые слова. Изменение климата, водные ресурсы, гидрологическое моделирование, HBV3-ЕНТ9, Таджикистан, Центральная Азия.

Введение. Водные ресурсы реки Зеравшан имеют важное значение в водodelении двух соседних стран Таджикистана и Узбекистана, так как, формируясь на территории Таджикистана, река полностью разбирается на ирригационные нужды в Узбекистане.

В данном исследовании автор выявил репрезентативную станцию для оценки стока реки Фандарья и провел оценку вклада основных метеопараметров в сток реки, с применением гидрологического моделирования в HBV3-ЕНТ9, была рассчитана внутригодовая и межгодовая динамика стока реки Фандарья на период до 2080 года. Целью данного исследования является оценка влияния метеопараметров на сток реки Фандарья и моделирование стока на будущую перспективу.

Данные и методология. Река Фандарья формируется в горах Памиро-Алая (территория Таджикистана) и имеет площадь бассейна около 3207 км², протяженность реки 24,5 км, среднегодовой расход воды 61,4 м³/с. Основной объем стока проходит в период с конца апреля по середину октября (Ниязов, 2022). Внутригодовая изменчивость стока велика, колебания стока в месяцы сезонного снеготаяния (март-июнь) составляют 27-52 %, в месяцы ледникового таяния (июль-август) – 38-63% годового стока (Шульц, 1965). В данном исследовании автором были использованы данные Таджгидромета по гидропосту р. Фандарья-Пете и метеопараметров (температуры воздуха осадков) по метеостанции Пенджикент, местоположение которых отмечено на рис.1.

Оценка репрезентативности данных метеостанций для стока реки Фандарья с использованием современного ряда данных проводилась автором статьи ранее и наилучшей была выявлена метеостанция Пенджикент (Ниязов, 2022). Для гидрологического моделирования были исполь-

зованы данные баланса массы ледника Абрамова (Barandun et al., 2017) за 2008-2017 гг., данные о современной площади оледенения Randolph Glacier Inventory 6.0., согласно которым, площадь оледенения составляет 6 % от площади бассейна реки Фандарья.

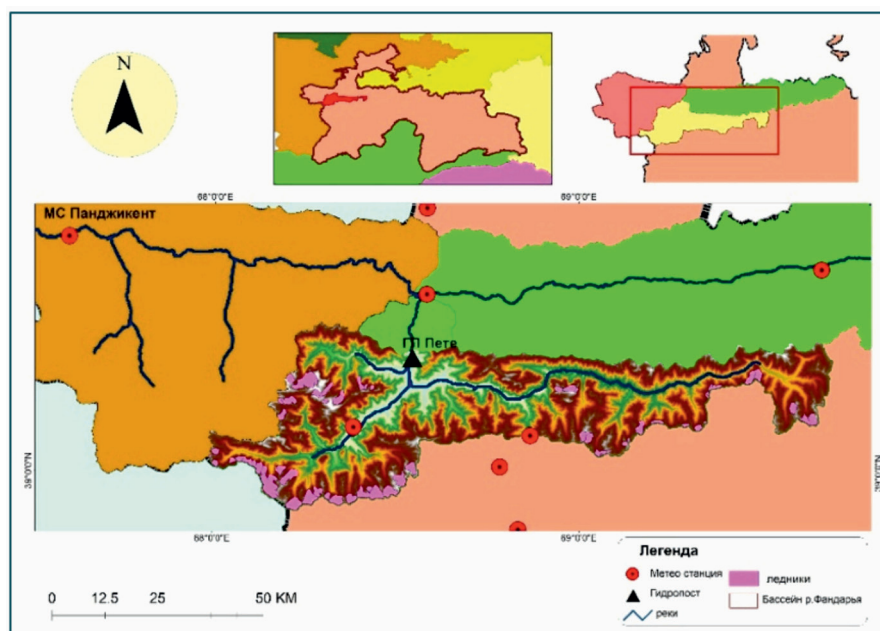


Рис. 1. Местоположение бассейна реки Фандарья в бассейне р. Зеравшан, размещение метеостанции Пенджикент и гидропоста р. Фандарья – Пете.

Для калибровки и расчетов стока р. Фандарья на будущие периоды была использована гидрологическая модель HBV3-ETH9 (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning). Это усовершенствованная модель HBV, которая позволяет рассчитывать суточный гидрограф стока на основе метеорологических и гидрологических данных наземных наблюдений (Bergström et al., 1992, Braun et al., 1992, Hottel et al., 1993). Модель HBV3-ETH9 имеет простую недетерминированную структуру, минимальный набор метеорологических параметров. Для подготовки входящих файлов в модель использовалась цифровая модель рельефа SRTM (90x90 м.). Далее в программе ArcGIS было проведено деление на высотные зоны через 200 метров, определение экспозиции и крутизны склонов, под-

готовка данных современного оледенения бассейна. Расчеты производились в программе MATLAB 2016a. Калибровка и валидация (верификация) модели HBV3-ETH9 для бассейна р. Фандарья проводилась в соответствии с руководством для пользователей (Konz M, 2003) на данных наблюдений за период 4-5 лет (с 2008 по 2012 и с 2013 по 2017годы). Результаты калибровки и валидации модели оценивались по коэффициенту корреляции R^2 , который должен быть более 0,60 и стремиться к 1,00. Диапазоны параметров для оптимизации модели HBV3-ETH9 были использованы из работы, проведенной исследователями для высокогорных рек Центральной Азии (Mayer, 2014).

Для расчетов изменения метеопараметров на будущее был проведен анализ проекций климата с использованием 25-и

глобальных климатических моделей МО-ЦАО CMIP, размещенных на портале платформы Earth System Grid Federation (<https://esgf.llnl.gov>) и объединены в ансамбль. Для приведения к единой широтно-долготной сетке был использован статистический метод, результаты которого представлены на платформе NASA NEX (National Aeronautics and Space Administration, NASA Earth Exchange, <https://cds.nccs.nasa.gov>). Корректировка осуществлена в соответствии с методом BCSD (Thrasher et al., 2012). Использование мульти-модельного подхода (ансамбля) позволяет усреднять данные и сокращать постоянную ошибку модели (Flato et al., 2013, Gleckler et al., 2008, Knutti et al., 2009).

Расчеты метеопараметров для метеостанции Пенджикент были подготовлены для двух сценариев репрезентативных траекторий концентрации парниковых газов: РТК4.5 и РТК8.5 (RCP4.5 и RCP8.5). Индекс сценария характеризует величину

антропогенного радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., а именно: RCP4.5 – стабилизационный сценарий, согласно которому радиационное воздействие стабилизируется к 2100 г. примерно на уровне 4,5 Вт/м²; RCP8.5 – сценарий высокой радиационной нагрузки, при котором она будет продолжать расти после 2100 г. По этому сценарию стабилизация концентраций произойдет только к 2250 г.; при этом концентрация CO₂ будет порядка 2000 ppm, что примерно в 7 раз выше ее доиндустриального уровня (Изменение климата 2014 г.: обобщающий доклад).

Результаты исследования. Парные коэффициенты корреляции среднемесячной температуры воздуха и осадков за холодный (октябрь-март) и теплый (апрель-сентябрь) периоды показывают, что метеостанция Пенджикент репрезентативна для моделирования стока р. Фандарья (табл.1).

Таблица 1. Коэффициенты корреляции (R) расходов воды р. Фандарья за период половодья (апрель-сентябрь) с температурой воздуха и осадками по метеостанции Пенджикент

R со среднемесячными значениями температуры воздуха												R с осадками за периоды	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	холодный	теплый
0.32	0.31	0.12	-0.43	-0.60	-0.50	0.13	-0.04	0.03	-0.13	0.40	-0.03	0.51	0.82

Наиболее высокие коэффициенты корреляции стока р. Фандарья за половодье отмечались с осадками за теплый период 0,82, за холодный период 0,51, с температурами воздуха за апрель - июнь – -0,43..., -0,60 и январь-февраль – 0,31..., 0,32. Необходимо отметить, что связь стока реки за половодье с температурами воздуха за апрель-июнь имеет обратный характер, чем ниже температуры воздуха, тем выше сток реки, что связано с особенностями процессов таяния сезонного снега и ледников в горных речных бассейнах Цен-

тральной Азии (Ниязов, 2022, Калашникова, 2022).

Годовой тренд температуры воздуха по метеостанции Пенджикент за современный период наблюдений 2000-2019 гг. сохраняется без изменений, тогда как тренды за месяцы показывают различную динамику. С мая по октябрь и в январе отмечается рост, с ноября по март – падение температуры воздуха (табл.2). Основной тенденцией суммы осадков за холодный и теплый периоды является их повышение на 122 мм/10 лет и 82 мм/10 лет, соответственно (табл.3).

Таблица 2. Уравнения линейных трендов среднемесячных температур воздуха по метеостанции Пенджикент

Месяц	Уравнение	Месяц	Уравнение	Месяц	Уравнение
1	$0.085x + 0.265$	2	$-0.1016x + 3.647$	3	$-0.0668x + 9.016$
4	$-0.0602x + 14.571$	5	$0.0517x + 18.733$	6	$0.0414x + 23.288$
7	$0.0729x + 24.476$	8	$0.1028x + 22.651$	9	$0.048x + 19.213$
10	$0.0187x + 13.373$	11	$-0.119x + 8.1995$	12	$-0.0659x + 2.9098$

Таблица 3. Уравнения линейных трендов суммы осадков за теплый и холодный периоды по метеостанции Пенджикент

Уравнение для холодного периода	Уравнение для теплого периода
$12.212x + 230.59$	$8.2477x + 109.36$

Преыдущие исследования внутригодовой динамики стока р. Фандарья показали, что значительное влияние на его формирование оказывают осадки, выпадающие в теплый период, далее по значимости – накопление осадков за холодный период и отмечающиеся аномалии температуры воздуха (Ниязов Дж.Б., 2022).

Климатические проекции, рассчитанные для метеостанции Пенджикент по

сценариям CMIP5 RCP4.5 показывают увеличение температуры воздуха на 2,3 оС, она составит 13,5-15,7 °С, а по сценарию CMIP5 RCP8.5 - на 4,3 °С и составит 14,0-17,6 оС (рис.2). Годовые суммы осадков по сценарию CMIP5 RCP4.5 составят 600-660 мм или 98-109 %, а по сценарию CMIP5 RCP8.5 – 608-668 мм или 101-110 % значений за 2006-2019 гг. (рис.3).

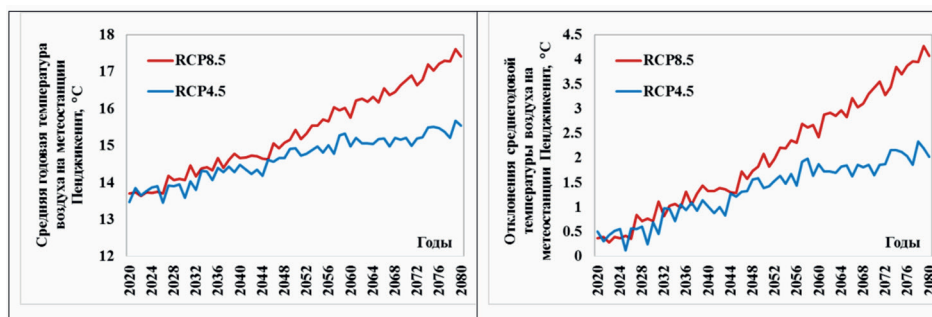


Рис.2. Рассчитанная для сценариев CMIP5 RCP4.5 и RCP8.5 температура воздуха (слева) и ее отклонение от значений за 2006-2018 гг. (справа) по метеостанции Пенджикент.

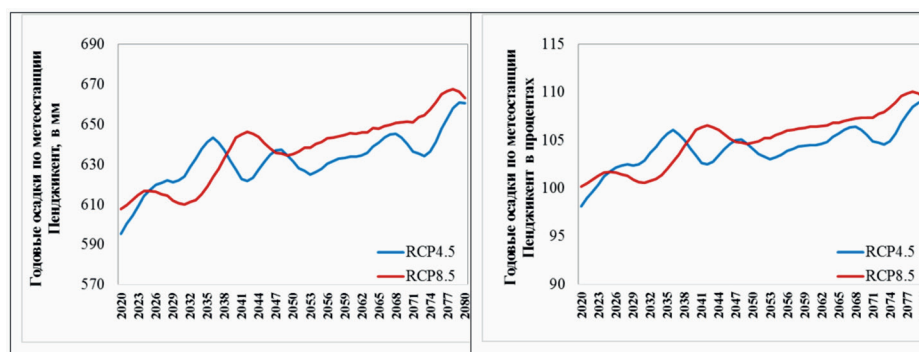


Рис.3. Рассчитанные для сценариев CMIP5 RCP4.5 и RCP8.5 изменения годовых сумм осадков в мм (слева) и в процентах от среднего значения за период 2006-2019 гг. (справа) по метеостанции Пенджикент.

Отклонения средних месячных температур воздуха и месячной суммы осадков за периоды по десятилетиям 2023-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 в сравнении с историческим периодом за 2006-2018 гг. представлены на рисунках 4, 5, 6 и 7.

Повышение температуры воздуха по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 ожидается во все месяцы, за исключением марта и мая (понижение на 0,7-1,2 оС в периоды с 2023 по 2040 гг. и на 0,2-0,3 оС в периоды

с 2023 по 2040 гг.). Наибольшее повышение температуры воздуха на метеостанции Пенджикент ожидается в период с июля по февраль – на 1,2-3,8 оС по сценарию RCP4.5 и на 2,7-6,2 оС по сценарию RCP8.5. Наибольшее увеличение количества осадков ожидается в январе и декабре на 30- 95 %, а в июне в 1,5-2,5 раза от значений за 2006-2018 гг. В период с июля по сентябрь количество осадков сохранится без изменений.

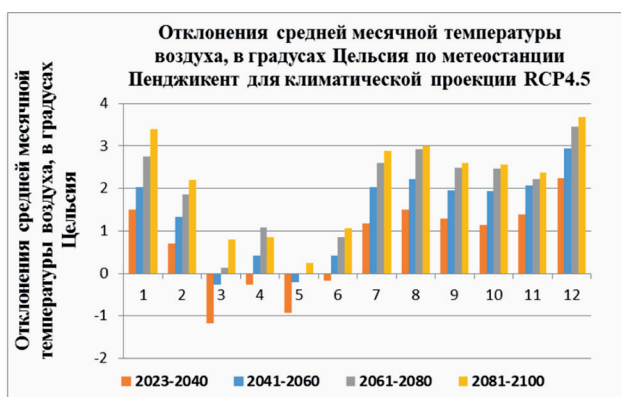


Рис.4. Рассчитанные для сценариев СМIP5 RCP4.5 отклонения средней месячной температуры воздуха в градусах Цельсия от среднего значения за период 2006-2018 гг. по данным метеостанции Пенджикент

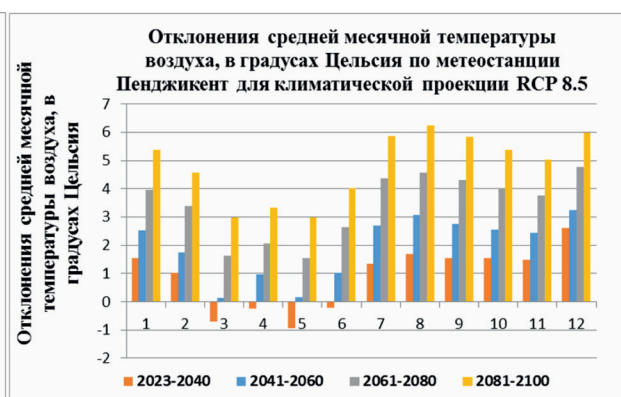


Рис. 5. Рассчитанные для сценариев СМIP5 RCP8.5 отклонения средней месячной температуры воздуха в градусах Цельсия от среднего значения за период 2006-2018 гг. по данным метеостанции Пенджикент

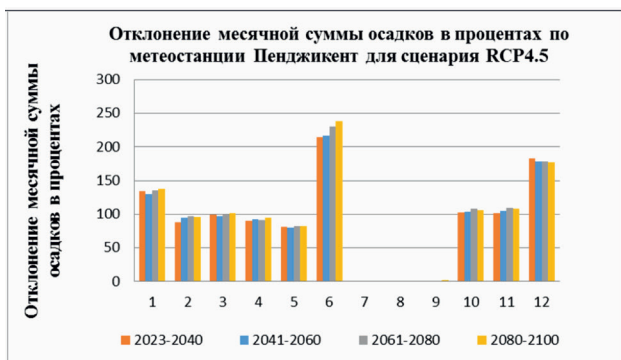


Рис.6. Рассчитанные для сценариев СМIP5 RCP4.5 изменения месячных сумм осадков в процентах от среднего значения за период 2006-2018 гг. по данным метеостанции Пенджикент

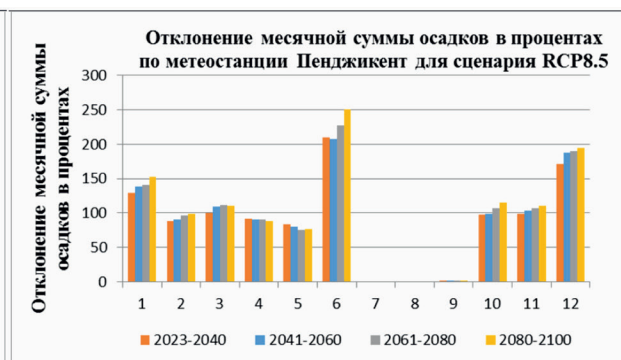


Рис.7. Рассчитанные для сценариев СМIP5 RCP8.5 изменения месячных сумм осадков в процентах от среднего значения за период 2006-2018 гг. по данным метеостанции Пенджикент

Калибровка модели HBV3-ETH9 для бассейна р. Фандарья за период 2008-2012 гг. показала коэффициенты корреляции R2 0,94 для смоделированного и наблю-

денного стока и валидации модели за период 2013-2017 гг. коэффициенты корреляции R2 0,94 90 (рис.8).

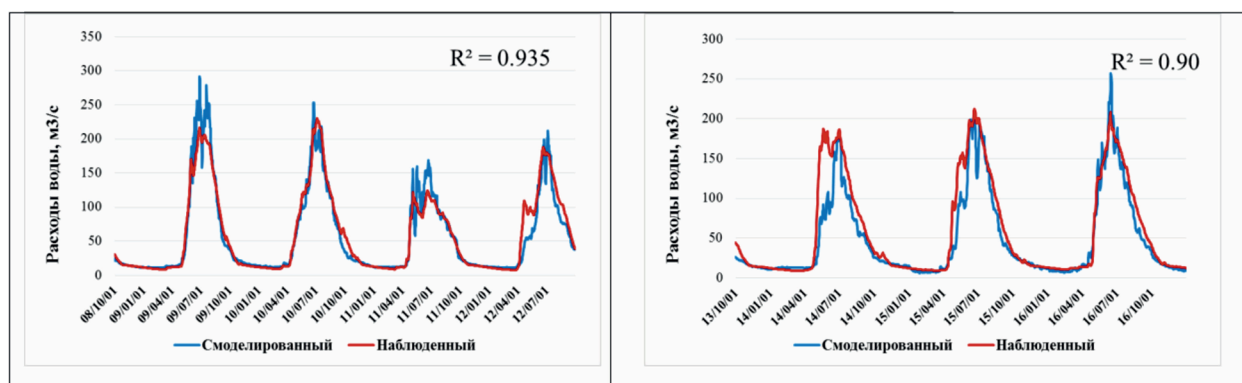


Рис. 8. Результаты калибрования (слева) и валидации (справа) модели HBV-ЕНТ для бассейна р. Фандарья.

Изменение стока на будущее зависит как от количества осадков в теплый и холодный периоды, так и от температуры воздуха в течение года и, особенно, в мае и июне. Расчеты, произведенные с помощью гидрологического моделирования, показывают, что к 2080 г. среднегодовые

расходы воды будут постепенно повышаться и составят 109-123% и 108-136% от значений за период 2000-2019 гг. (рис.9), что связано с повышением температуры воздуха и увеличением количества осадков, особенно в зимний период.

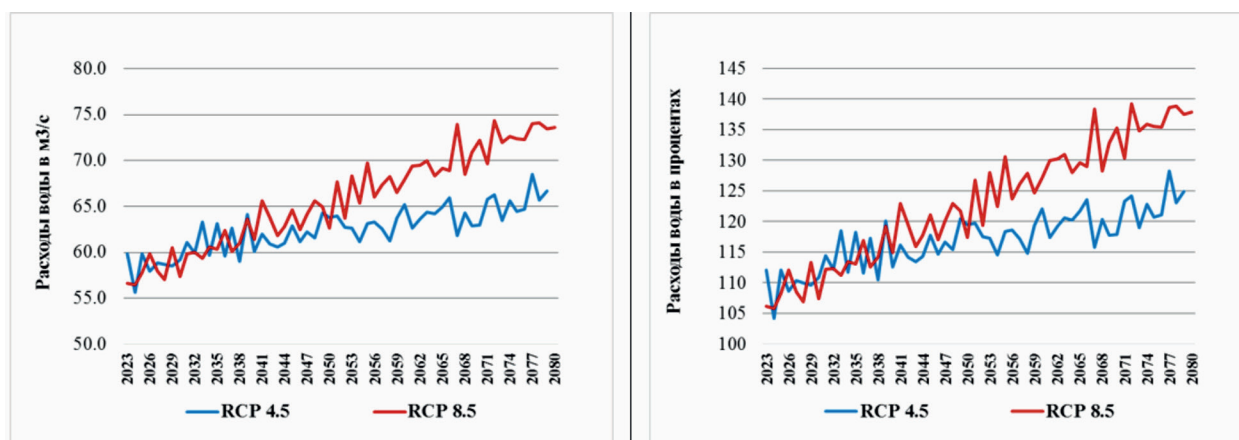


Рис. 9. Межгодовая изменчивость расходов воды р. Фандарья в м³/с (слева) и в процентах от значений за 2000-2019 гг. (справа) по RCP 4.5 и RCP 8.5.

Объем стока за период май-сентябрь увеличится, что связано с усиленной водоотдачей ледников и увеличением осадков за холодный период и июнь. На рис. 10 показаны отклонения средних месячных расходов воды в м³/с, на рис. 11 и 12 они показаны в процентах от нормы. Так, по климатическим сценариям RCP 4.5 и RCP 8.5 к 2080 году понижение стока ожидается в марте на 1,5-3,8 м³/с или 69-88 % месячной нормы. Повышение стока

в соответствии с климатическими проекциями RCP 4.5 («средний») ожидается в мае, июле-сентябре на 7,7-33,5 м³/с (118-159 % нормы), в апреле, июне и в октябре на 3,7-12,2 м³/с (116-145 % нормы). В соответствии с климатическими проекциями RCP 8.5 («экстремальный»), повышение стока ожидается в мае, июле-сентябре на 5,1-45,4 м³/с (129-184 % нормы), в апреле, июне и в октябре на 9,2-24,2 м³/с (122-194 % нормы).

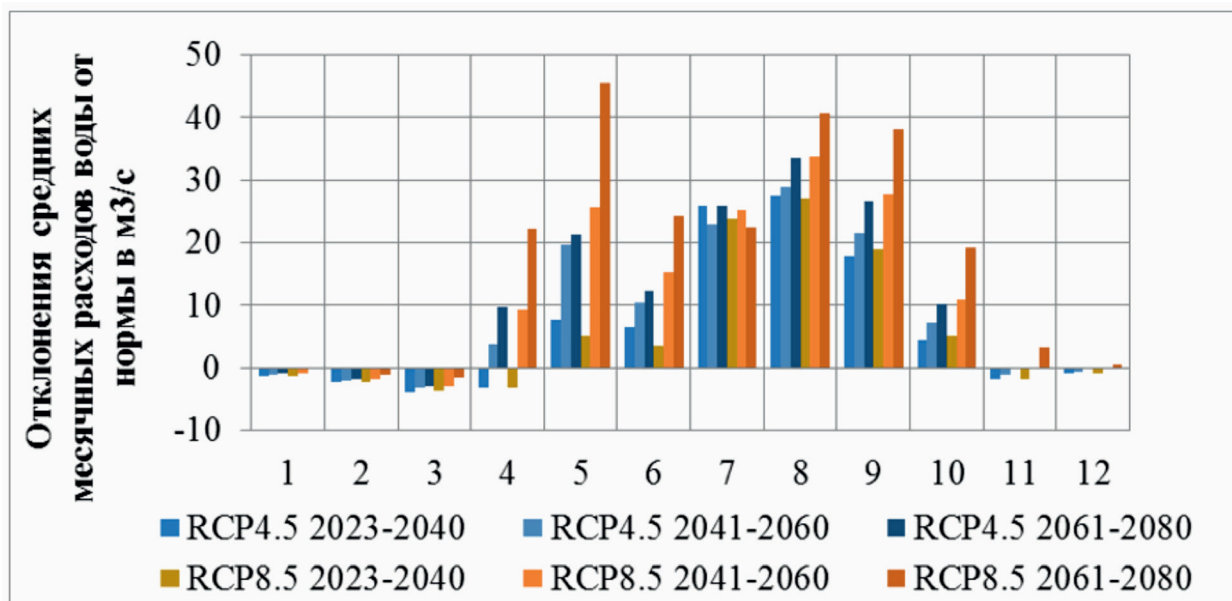


Рис. 10. Отклонения средних месячных расходов воды от нормы в м³/с по сценариям CMIP5 RCP4.5 и RCP8.5.

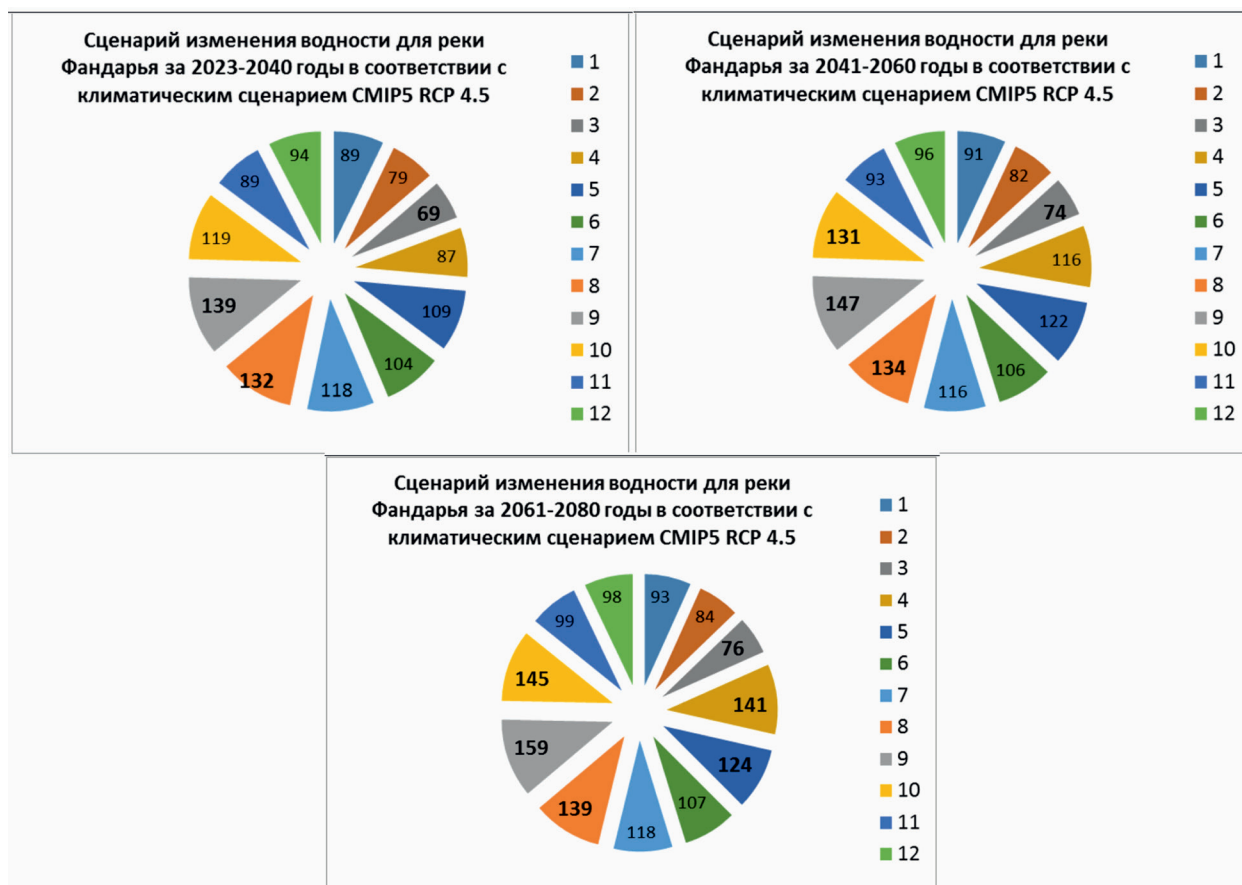


Рис. 11. Отклонения средних месячных расходов воды в процентах от нормы по сценариям CMIP5 RCP4.5



Рис. 12. Отклонения средних месячных расходов воды в процентах от нормы по сценариям CMIP5 RCP4.5

Заключение.

Наиболее влияние на сток р. Фандарья в период половодья оказывают осадки за теплый период и холодный период, а также температуры воздуха за период апрель - июнь и январь-февраль. Расчеты водности реки Фандарья на период до 2080 года с применением климатических проекций CMIP5 RCP4.5 (средний) и RCP8.5 (экстремальный) показывают увеличение объема стока. Это связано как с повышением температуры воздуха и усиленной водоотдачей ледников (площадь оледенения значительна – 6 % площади бассейна), а также увеличением осадков как в январе и феврале, формирующих снегозапасы, так и в июне, в период прохождения паводков.

Расчеты с применением гидрологического моделирования HBV3-ЕНТ9 показывают, что сток реки Фандарья в период

паводков будет значительно увеличиваться, что приведет к усилению и более частому прохождению селей и паводков. Интенсивное таяние ледников и сезонного снега будет способствовать прохождению двух пиков паводков в июне и в июле.

В связи с этим, в бассейне реки Фандарья рекомендуется принимать превентивные берегоукрепительные и другие мероприятия по защите населения и народнохозяйственных объектов от селей и наводнений; рекомендуется усиление мониторинга в зоне формирования стока, создание систем раннего предупреждения о подъемах уровня воды. Необходимо проводить разъяснительную работу с местными сообществами об ожидаемых климатических изменениях и изменении стока реки в будущем.

Список литературы

1. Изменение климата 2014 г.: обобщающий доклад. (2014). Женева: МГЭИК. 163 с.
2. Шульц В.Л. (1965). Реки Средней Азии. Л: Гидрометеиздат. С. 692.
3. Ниязов Дж.Б. (2022). Влияние климатических факторов на гидрологический режим реки Фандарья. Научно-практический журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. Т.2 №3. Душанбе. С. 34 – 39.
4. Martina Barandun, Matthias Huss, Ryskul Usabaliev, Erlan Azisov, Etienne Berthier, Andreas Käb, Tobias Bolch and Martin Hoelzle. (2018). Multi-decadal mass balance series of three Kyrgyz glaciers inferred from modelling constrained with repeated snow line observations. The Cryosphere, 12, 1899–1919. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1899-2018>.
5. Thrasher B., Maurer E. P., McKellar C., Duffy P. B. (2012). Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. Hydrology and Earth System Sciences. № 16 (9).
6. Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., and Rummukainen, M. (2013). Evaluation of Climate Models, in Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
7. Gleckler, P. J., Taylor, K. E., and Doutriaux, C. (2008). Performance metrics for climate models, J. Geophys. Res.-Atmos., 113, D06104, <https://doi.org/10.1029/2007JD008972>
8. Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., Meehl, G. A., Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., and Meehl, G. A. (2010). Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. J. Climate, 23, 2739–2758. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3361.1>
9. Bergström S. (1992). The HBV model – its structure and applications . SMHI Reports Hydrology. Norrköping, Sweden, № 4.
10. Braun, L.N. und Renner, C.B. (1992). Application of a conceptual runoff model in different physiographic regions of Switzerland. Hydrological Sciences-Journal. № 37, 3.
11. Hottel, Ch.; Braun, L.N.; Leibundgut, Ch. und Rieg, A. (1993). Simulation of Snowpack and Discharge in an Alpine Karst Basin. IHS Publication No. 218.
12. Konz M. (2003). User Manual HBV3-EHT9. Commission for Glaciology of the Bavarian Academy of Sciences and Humanities.
13. Mayer E., Juen M., Mayer Cr., Usabaliev R. & Hagg W. (2014). Modeling runoff from the Inylchek glaciers and filling of ice-dammed lake Merzbacher, Central Tian Shan // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 96:4, 609-625. doi.org/10.1111/geoa.12061
14. Калашникова О.Ю. (2022). Исследование влияния климатических факторов на формирование стока рек Нарынского бассейна. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Бишкек. С.160.
15. Ниязов Дж.Б. (2022). Вклад ледникового и талого снегового питания в годовой сток реки Фандарья. Доклады Национальной академии наук Таджикистана. Том 65 № 5-6. Душанбе. С. 390-397.

ИСТИФОДАИ МОДЕЛИ HBV-ЕНТ БАРОИ АРЗЁБИИ МАҶРОИ ФОНДАРЁ БАРОИ ДАВРАИ ТО СОЛИ 2080

Ниязов Ч.Б.

Аннотатсия: Модели гидрологии HBV3-ЕНТ9 барои дарёҳои кӯҳӣ бо майдони назарраси яхбандӣ бомуваффақият истифода мешавад. Дар ин тадқиқот он ба ҳавзаи дарёи Фандарё таъбиқ шудааст, ки дар асоси пешгӯии иқлими CMIP5 RCP4.5 ва RCP8.5 сценарияҳои тағйироти захираҳои об то соли 2080 ҳисоб карда шудаанд. То соли 2080 мутобиқи сценарияи иқлимии RCP 4,5 инҳироф дар ҳарорати солонаи ҳаво 2,3°C ва боришоти солона 98-109% меёро таъкил медиҳад ва аз ин рӯ, 23% зиёд шудани захираи об пешбинӣ шудааст. аз меёр. Мувофиқи сценарияи РКП 8,5 тафовути ҳарорати солонаи ҳаво 4,3°C ва боришоти солона 101-110% ва оби дарёи Фандарё 36% зиёд мешавад. Дар давоми сол дар ҳамаи моҳҳо баланд шудани ҳарорати ҳаво пешбинӣ карда мешавад. Миқдори боришот дар моҳҳои январ ва декабр ба таъри назаррас - 30-95% аз меёр ва дар моҳи июн 1,5-2,5 маротиба нисбат ба солҳои 2006-2018 зиёд мешавад. Вобаста ба ин, дар тақсими маҷрои дохилисола ду авҷи серобӣ дар моҳҳои июн ва июл дар назар аст. Афзоиши миқдори об дар моҳҳои баҳор ба афзоиши серобӣ ва обхезӣ мусоидат мекунад.

Калидвожаҳо. тағйирёбии иқлим, захираҳои об, моделкунонии гидрологӣ, HBV3-ЕНТ9, Тоҷикистон, Осиёи Марказӣ.

APPLICATION OF THE HBV-EHT MODEL FOR RUNNOW ASSESSMENT RIVERS OF FANDARYA FOR THE PERIOD UNTIL 2080

Niyazov J.

Annotation: The hydrological model HBV3-EHT9 is successfully used for mountain rivers with a significant area of glaciation. In this study, it is applied to the Fandarya River basin, where, based on climate projections CMIP5 RCP4.5 and RCP8.5, scenarios for changes in water resources until 2080 were calculated. By 2080, in accordance with the climate scenario RCP 4.5, the deviation in annual air temperature will be 2.3 °C, and the annual precipitation will be 98-109% of the norm, and therefore, water availability is expected to increase by 23% of the norm. According to the RCP 8.5 scenario, the deviation in annual air temperature will be 4.3 °C, and the annual precipitation will be 101-110% of the norm and the water content of the Fandarya River will increase by 36% of the norm. Within the year, air temperatures are expected to increase in all months. Monthly precipitation will increase significantly in January and December - by 30-95% of normal, and in June by 1.5-2.5 times from the values for 2006-2018. In this regard, in the intra-annual flow distribution, two flood peaks are expected to occur in June and July. An increase in water content in the spring months will contribute to increased mudflow and flood activity.

Keywords. climate change, water resources, hydrological modeling, HBV3-EHT9, Tajikistan, Central Asia.