

УДК 631.9:528.8

ПРИМЕНЕНИЕ СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ИНДЕКСОВ ОСАДКОВ И ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАСУХИ В ШИРОТАХ С ОТЛИЧАЮЩИМИСЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

И. Ш. Норматов^{1*}, А. О. Рахимзода², З. И. Сафарова³,
Г. Н. Сабурова¹

¹ Таджикский национальный университет (пр. Рудаки, 17, Душанбе, Республика Таджикистан, 734025), *inomtnor@mail.ru

² Институт математики Национальной Академии наук Таджикистана (ул. Айни, 299, Душанбе, Республика Таджикистан, 735610)

³ Агентство по гидрометеорологии Республики Таджикистан (ул. Б. Гафурова, 373, Душанбе, Республика Таджикистан, 734025)

Представлены результаты мониторинга возникновения засухи в верховье и низовье реки Варзоб (Таджикистан), характеризующихся разными климатическими условиями, с использованием стандартизированного индекса осадков (SPI) и стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации (SPEI). Установлено, что тренд уменьшения значений SPI и SPEI в низовье реки с коэффициентами корреляции соответственно 0,23 и 0,63 существеннее, чем в верховье с коэффициентами корреляции 0,08 и 0,26 соответственно. Обнаружено, что благоприятные условия возникновения засухи создаются определенным сочетанием метеорологических параметров, а именно дефицитом осадков и температурой со значениями, превышающими климатическую норму.

Ключевые слова: река Варзоб; засуха; верховье реки; низовье реки; SPI; SPEI; температура; осадки; климатическая норма; метеорологическая станция; Анзоб; Айвадж

Для цитирования: Норматов И. Ш., Рахимзода А. О., Сафарова З. И., Сабурова Г. Н. Применение стандартизированных индексов осадков и эвапотранспирации для оценки засухи в широтах с отличающимися метеорологическими условиями // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 8. С. 181–188. doi: 10.17076/eco1985

Финансирование. Работа выполнена в рамках плана научно-исследовательских работ кафедры метеорологии и климатологии Таджикского национального университета в сотрудничестве с Агентством по гидрометеорологии и Институтом математики Национальной Академии наук Таджикистана

**I. Sh. Normatov^{1*}, A. O. Rahimzoda², Z. I. Safarova³, G. N. Saburova¹.
APPLICATION OF STANDARDIZED PRECIPITATION AND EVAPOTRANSPIRATION INDICES TO ASSESS DROUGHT AT LATITUDES WITH DIFFERENT METEOROLOGICAL CONDITIONS**

¹Tajik National University (17 Rudaki Ave., 734025 Dushanbe, Republic of Tajikistan),
*inomnor@mail.ru

²Institute of Mathematics, National Academy of Sciences of Tajikistan (299 Ayni St.,
735610 Dushanbe, Republic of Tajikistan)

³Agency for Hydrometeorology of the Republic of Tajikistan (373 B. Gafurov St., 734025
Dushanbe, Republic of Tajikistan)

The article presents the results of monitoring drought occurrence in the upper and lower reaches of the Varzob River (Tajikistan), characterized by different climatic conditions, using the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI). We found that the downward trend of SPI and SPEI in the lower reaches, with correlation coefficients of 0.23 and 0.63, respectively, was more significant than in the upper reaches, characterized by correlation coefficients of 0.08 and 0.26. The study shows that drought-conducive conditions are created by a certain combination of meteorological parameters, namely precipitation deficit and temperatures above the climatic normal.

Keywords: Varzob River; drought; upstream; downstream; SPI; SPEI; temperature; precipitation; climatic normal; weather station; Anzob; Ayvaj

For citation: Normatov I. Sh., Rahimzoda A. O., Safarova Z. I., Saburova G. N. Application of standardized precipitation and evapotranspiration indices to assess drought at latitudes with different meteorological conditions. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 8. P. 181–188. doi: 10.17076/eco1985

Funding. The work was carried out in the framework of the research work plan of the Department of Meteorology and Climatology of the Tajik National University in cooperation with the Agency for Hydrometeorology and the Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Tajikistan.

Введение

Современный этап развития человечества протекает в условиях постоянных вызовов, обусловленных глобальными факторами изменения климата, что вносит существенные корректизы в функционирование компонентов экосистемы. Ныне все усилия человеческой мысли направлены на разработку механизмов ослабления негативных воздействий и последствий изменения климата, а также адаптации всей сферы деятельности к его катаклизмам [Normatov et al., 2019].

Традиционно установленные нормы обеспечения различных отраслей экономики водой в условиях потепления климата сталкиваются с расстройством сложившегося механизма. Проблема водообеспеченности населения и отраслей экономики ощущается с 60–70-х годов XX в., а проявления дефицита воды привели к возникновению концепции водной безопасности. С тех пор внимание ученых и международного сообщества к водной проблеме стремительно возросло [Normatov et al., 2020; Норматов и др., 2023].

Согласно сведениям Всемирной метеорологической организации, средняя глобальная

температура приземного воздуха за прошедшее столетие повысилась на 1,2 °C и составила +14,9 °C [Pörtner et al., 2022]. С потеплением климата увеличилось количество и продолжительность метеорологических засух. Засуха как одно из опасных погодных явлений оказывает существенное негативное влияние на доступность воды в почве, устойчивость экосистем, развитие сельскохозяйственных культур и их продуктивность [Страшная и др., 2018], следствием чего являются социально-экономические и экологические потери от регионального масштаба до глобального. В отличие от прочих гидрометеорологических явлений засуха затрагивает вопросы продовольственной безопасности людей и влияет не только на величину урожайности культур, но и на качество урожая.

Существующие методы оценки засухи основаны на учете показателей увлажненности территории в течение разных интервалов и изучении частоты засухи. Полученная информация служит для мониторинга засухи и оценки ее продолжительности. Научные исследования, посвященные анализу агроклиматических ресурсов, оценке и мониторингу метеорологиче-

ской засухи на основе данных разного временного разрешения, наиболее актуальны в настоящее время [Павлова, 2024].

В 1993 году разработан стандартизированный индекс осадков SPI [McKee et al., 1993], который использует строгий аппарат математической статистики для оценки засухи по ретроспективным и текущим данным о количестве атмосферных осадков. Ныне разработан ряд соответствующих компьютерных программ для расчета этого индекса [Зубов, Зубова, 2017]. В основе метода лежит предположение, что количество атмосферных осадков подчиняется гамма-распределению. Алгоритм расчета SPI согласно [Edwards, McKee, 1997] следующий: а) по данным сумм осадков строится функция гамма-распределения, имеющая вид:

$$f_{\alpha, \beta} = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-x/\beta},$$

где α и β – положительные параметры формы и масштаба, $x > 0$ – количество осадков, $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера. Параметры данной функции определяют для каждой метеостанции с выбранным временным разрешением и на основании плотности распределения строят функцию кумулятивной вероятности, после чего преобразуют ее к вероятности стандартной нормально распределенной случайной величины. С помощью полученного нормального распределения приводят суммы осадков к форме индекса SPI.

Несмотря на широкое распространение стандартизированного индекса осадков (SPI), он не учитывает другие метеорологические параметры, характеризующие атмосферные условия, такие как температура, скорость ветра и влажность, способные влиять на интенсивность засухи.

В оценке и мониторинге засухи с помощью SPI учитываются только осадки. Индекс SPI может быть рассчитан для разных интервалов, от одного месяца до календарного года и более. Данный индекс рекомендован к использованию Всемирной метеорологической организацией. К достоинствам SPI можно отнести удобство использования, которое состоит в учете только величины осадков.

Методика вычисления индекса SPI не предполагает использование сведений о географическом местоположении измеряемых исходных данных. Стандартизированный индекс осадков учитывает только многолетнее распределение осадков. Количественная оценка дефицита осадков осуществляется относительно среднего многолетнего значения. Индекс принимает положительные и отрицательные значения. Положительные значения используют для ха-

рактеристики влажных условий. Отрицательные значения направлены на описание засушливых погодных условий. В частности, если значение индекса менее -2 ($SPI \leq -2$), то его используют для характеристики экстремальной засухи. К числу недостатков можно отнести следующие: стандартизированный индекс осадков не позволяет учитывать другие составляющие уравнения водного баланса; при расчете индекса SPI не учитываются изменения температуры приземного воздуха.

Как показывают последние исследования в области мониторинга засухи, в чрезвычайно засушливые и экстремально засушливые годы важно учитывать изменения температуры воздуха и величины испаряемости [Ben Mhenni et al., 2021]. В условиях глобального потепления при постепенном увеличении средней месячной температуры приземного воздуха при оценке и прогнозировании засухи важно учитывать изменение температуры воздуха.

Для восполнения возможности SPI и широкого охвата ключевых климатических характеристик разработан стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации (SPEI). Стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации нормализует аномалии в накопленном климатическом водном балансе, определяемом как разница между осадками и потенциальным испарением, и тем самым обеспечивает комплексный показатель водной доступности, включающий более широкий спектр климатических условий.

В отличие от SPI стандартизированный индекс осадков и испаряемости SPEI отражает основное влияние повышения температуры на потребность растений в воде.

Методика вычисления климатического индекса SPEI основана на использовании функции плотности распределения значений разности осадков и испаряемости.

Включение потенциального испарения (ПЭТ) в SPEI необходимо тщательно тестиировать, чтобы определить, приводит ли это включение к существенному отличию значений индекса от уже принятого SPI, и выявить чувствительность SPEI к различным формулам ПЭТ [McMahon et al., 2013]. Установлено, что простые или сложные методы определения ПЭТ не имеют большого значения при расчете индексов засухи [Vicente-Serrano et al., 2010].

Целью настоящей работы является определение различий возникновения засухи между географическими широтами с отличающимися климатическими условиями с применением стандартизированных индексов осадков и эвапотранспирации.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются зона формирования (3373 м н. у. м.) и низовье (318 м н. у. м.) реки Варзоб, притока трансграничной реки Амударья в Центральной Азии. Для оценки климатических условий в верховье и низовье реки Варзоб использовались данные метеорологических станций Анзоб (39°05' с. ш. 68°52' в. д.) и Айвадж (36°58' с. ш. 68°02' в. д.) соответственно. Верховье реки Варзоб характеризуется климатическими нормами температуры 1,8 °С и атмосферных осадков 480 мм, а низовье – 17,5 °С и 175 мм соответственно.

Для обработки климатических данных метеорологических станций Анзоб и Айвадж использованы статистические, корреляционные методы и при определении засухи – стандартизованный индекс осадков и стандартизованный индекс осадков и эвапотранспирации, рекомендованные Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО) и Всемирной метеорологической организацией (ВМО).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена динамика изменения стандартизированного индекса осадков и стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации верховья реки Варзоб, рассчитанная с использованием данных метеостанции Анзоб. Диаграмма на рисунке показывает, что верховье реки характеризуется убывающими трендами индексов засухи за период 1992–2023 гг., но в количественном выражении свидетельствует об отсутствии сильных и экстремальных засух.

Представляется важным изучение динамики стандартизованных индексов осадков и

евапотранспирации как показателей степени глубины и продолжительности засухи. На рис. 2 представлено отклонение среднемесячных значений атмосферных осадков и температуры от климатических норм по данным метеостанции Анзоб за период 1992–2023 гг., которые использовались для оценки среднемноголетних значений стандартизированного индекса осадков и стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации.

Из рис. 2 видно, что атмосферные осадки с января по март превышают климатическую норму, а значения среднемесячных температур ниже климатической нормы. Соответственно, SPEI характеризуется в эти месяцы положительными значениями. При этом SPI имеет отрицательное значение. Согласно нашему предположению, это связано с агрегатным состоянием осадков и их фазовыми превращениями.

Отрицательные значения SPI и SPEI с июня по декабрь обусловлены повышенными значениями температуры относительно климатической нормы в верховье реки Варзоб. Небольшие положительные значения SPI и SPEI в апреле и мае также можно связать с фазовыми превращениями агрегатных состояний атмосферных осадков (рис. 3).

Среднегодовые значения SPI и SPEI низовья реки Варзоб за период 1993–2023 гг., основанные на соответствующих расчетах по данным метеорологической станции Айвадж, показаны на рис. 4.

Сравнение SPI и SPEI верховья и низовья реки Варзоб говорит о существенном их различии. Тренд изменения SPI и SPEI в низовье реки с коэффициентами корреляции 0,23 и 0,63 значительно, чем в верховье с коэффициентами корреляции 0,08 и 0,26 соответственно. Это обусловлено обильными осадками весной и осенью, характерными для верховья реки Варзоб.

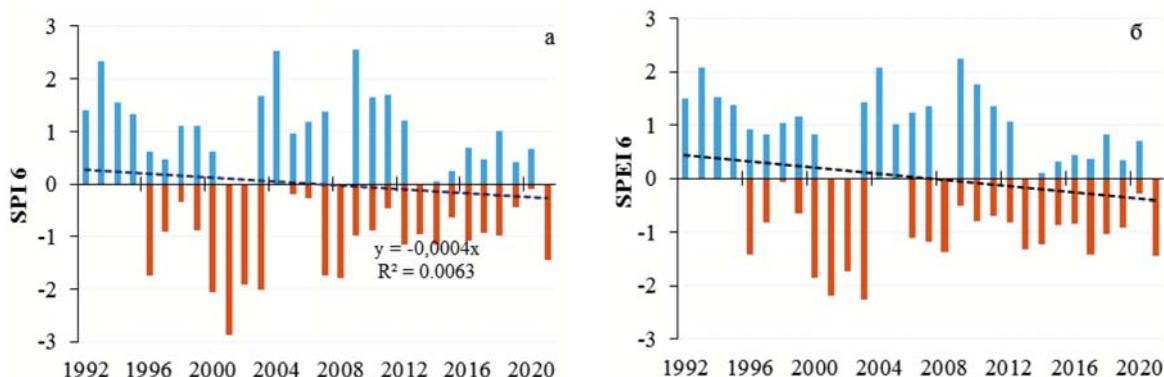


Рис. 1. Динамика SPI (а) и SPEI (б) в верховье реки Варзоб для 6-месячного временного масштаба

Fig. 1. SPI (a) and SPEI (b) dynamics in the upstream of the Varzob River for 6-month time scale

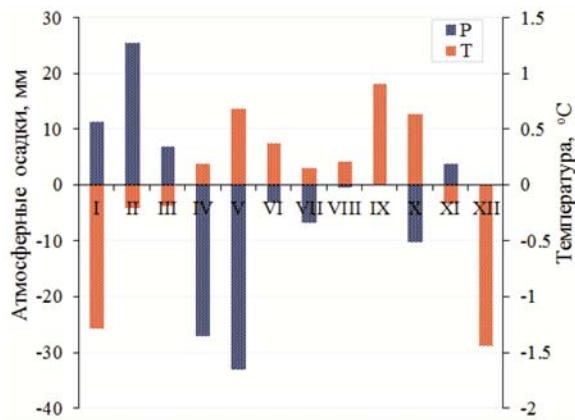


Рис. 2. Отклонение многолетних среднемесячных значений атмосферных осадков и температуры от климатических норм по данным метеостанции Анзоб
 Fig. 2. Deviation of long-term average monthly precipitation and temperature from climatic norms according to data of the Anzob Meteorological Station



Рис. 3. Многолетние среднемесячные значения SPI и SPEI в верховье реки Варзоб
 Fig. 3. Long-term monthly values of SPI and SPEI in the upstream of the Varzob River

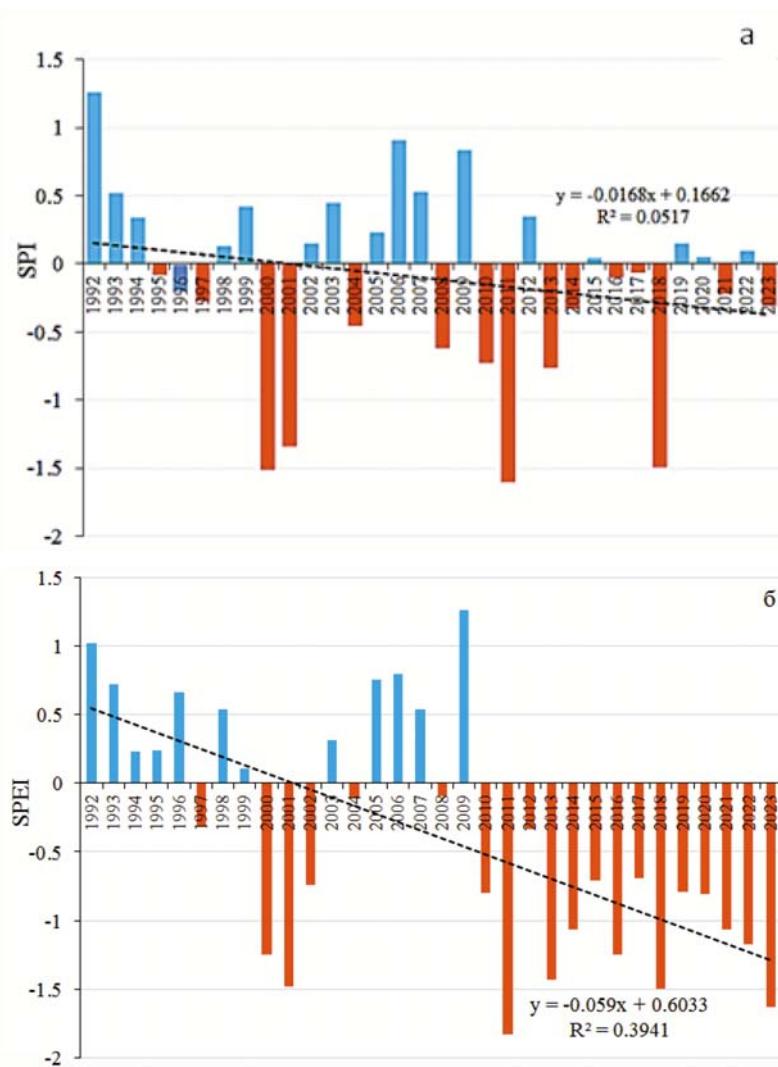


Рис. 4. Динамика SPI (а) и SPEI (б) в низовье реки Варзоб для 6-месячного временного масштаба

Fig. 4. SPI (a) and SPEI (b) dynamics in the downstream of the Varzob River for 6-month time scale

Из рис. 5, на котором приведены многолетние среднемесячные значения SPI и SPEI, видно, что стандартизованный индекс осадков имеет положительное значение только в январе, феврале, ноябре и декабре, а в остальные месяцы рассмотренный район испытывает дефицит осадков и среднемесячная температура почти целый год превышает климатическую норму (рис. 6).

Как следует из рис. 6, в низовье реки Варзоб за период 2010–2023 гг. значение SPEI только отрицательное, что, как отмечено выше, может

быть обусловлено двумя факторами: дефицитом осадков или высокими среднемесячными значениями температуры.

За рассмотренный период в низовье реки Варзоб создавались благоприятные метеорологические условия для возникновения засухи. Об этом свидетельствует представленная на рис. 7 динамика атмосферных осадков и температуры. Как видно из рис. 7, средняя многолетняя температура характеризуется возрастающим трендом при убывающем тренде атмосферных осадков.

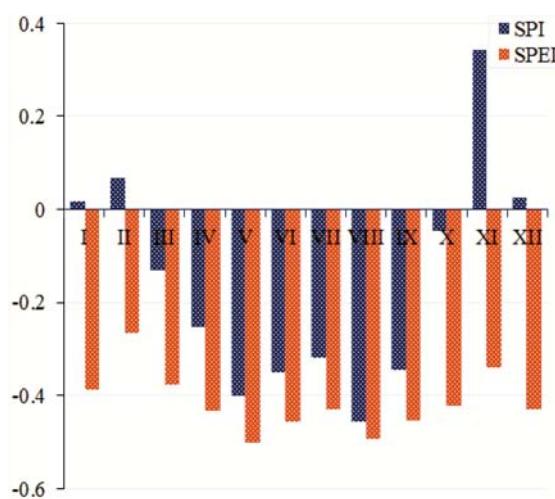


Рис. 5. Среднемесячные значения SPI и SPEI в низовье реки Варзоб за период 1992–2023 гг.

Fig. 5. Mean monthly values of SPI and SPEI in the downstream of the Varzob River for the period 1992–2023

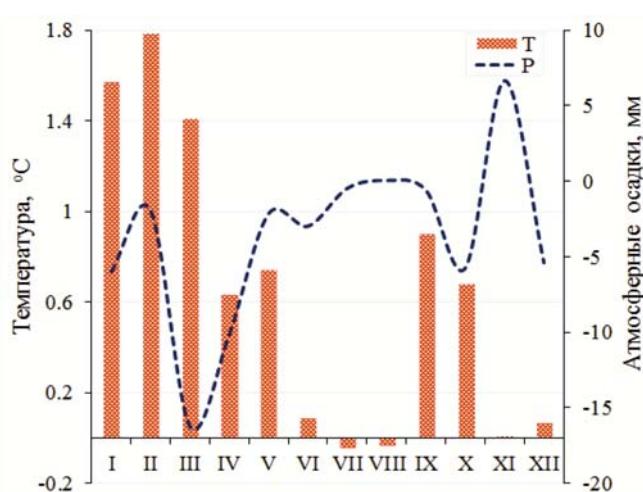


Рис. 6. Отклонение среднемесячных температур и осадков от климатических норм в низовье реки Варзоб по данным метеостанции Айвадж

Fig. 6. Deviation of average monthly temperatures and precipitation from climatic norms in the downstream of the Varzob River according to the Ayvaj Meteorological Station data

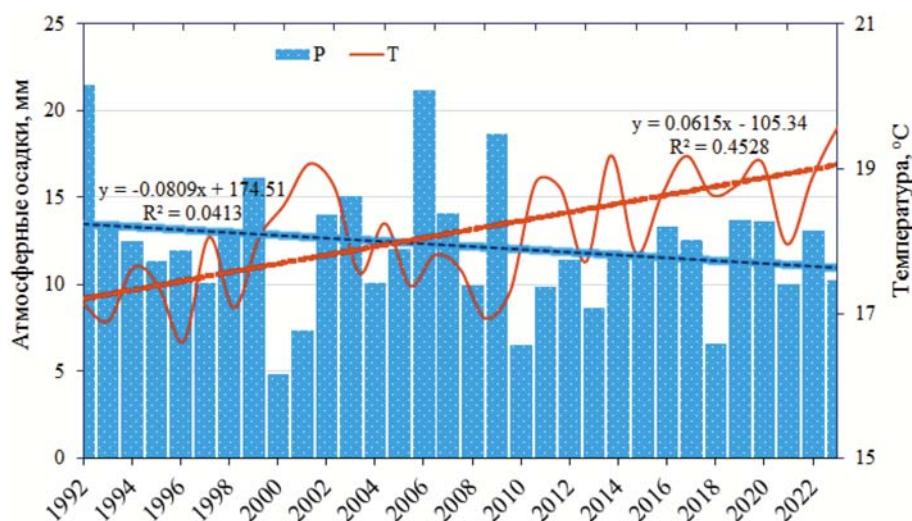


Рис. 7. Динамика атмосферных осадков и температуры в низовье реки Варзоб за период 1992–2023 гг.

Fig. 7. Dynamics of precipitation and temperature in the downstream of the Varzob River for the period 1992–2023

Заключение

Представлены результаты оценки частоты засухи в верховье и низовье реки Варзоб, характеризующихся разными климатическими условиями, с использованием стандартизированного индекса осадков (SPI) и стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации (SPEI). Обобщение итогов тридцатилетних исследований (1993–2023 гг.) показывает, что выпадение достаточного количества атмосферных осадков и низкая среднемесячная температура предохраняют верховье реки от возникновения сильных и экстремальных засух. В низовье, напротив, дефицит осадков и среднемесячные температуры выше климатической нормы благоприятствуют увеличению частоты возникновения засухи. Установлено нарастание в низовье реки Варзоб увеличения среднегодовых температур и уменьшения количества атмосферных осадков.

Литература

Зубов А. Р., Зубова Л. Г. Гидрологические особенности рек бассейнов Азовского и Черного морей. Луганск: ФЛП Пальчак А. В., 2017. 230 с.

Норматов И. Ш., Шерматов Н., Норматов П. И., Маркаев Б. А., Норматов А. И. Формирование и изменение химического состава воды вдоль русла трансграничной реки Пяндж (Таджикистан) // Геосферные исследования. 2023. № 4. С. 65–76. doi: 10.17223/25421379/29/4

Павлова А. И. Оценка метеорологической засухи на основе климатического стандартизированного индекса осадков и испаряемости // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 5. С. 605–616. doi: 10.32417/1997-4868-2024-24-05-605-616

Страшная А. И., Бирман Б. А., Береза О. В. Особенности засухи 2012 г. на Урале и в Западной Сибири и ее влияние на урожайность яровых зерновых культур // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 154–169.

Ben Mhenni N., Shinoda M., Nandintsetseg B. Assessment of drought frequency, severity, and duration and its impacts on vegetation greenness and agriculture production in Mediterranean dryland: A case study in Tunisia // Natural Hazards. 2021;105: 2755–2776.

Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Pörtner H. O., Roberts D., Tignor M. M. B. et al. (eds.). Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. doi: 10.1017/9781009325844

Edwards D. C., McKee T. B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales // Climatology Report. No. 97(2). Fort Collins: Colorado State University, 1997. 155 p.

McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // Applied Climatology: Proc. 8th Conf. (Anaheim, USA, 17–22 January 1993). P. 179–184.

McMahon T. A., Peel M. C., Lowe L., Srikanthan R., McVicar T. R. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2013. Vol. 17. P. 1331–1363. doi: 10.5194/hess-17-1331-2013

Normatov I. Sh., Armstrong R., Normatov P. I. Comparative estimation of river runoff formation in the climatic zones of Gorn Pamir // Sustain. Develop. Mount. Terr. 2020. Vol. 12, no. 3. P. 366–372. doi: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-366-372

Normatov P. I., Armstrong R., Normatov I. Sh. Assessment of the influence of climate change on snow ice resources and hydrology of Mountain Pamir Rivers // Sustain. Develop. Mount. Terr. 2019. Vol. 11, no. 3. P. 295–304. doi: 10.21177/1998-4502-2019-11-3-295-304

Vicente-Serrano S. M., Beguería S., López-Moreno J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index // J. Clim. 2010. Vol. 23. P. 1696–1718. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1

References

Ben Mhenni N., Shinoda M., Nandintsetseg B. Assessment of drought frequency, severity, and duration and its impacts on vegetation greenness and agriculture production in Mediterranean dryland: A case study in Tunisia. *Natural Hazards*. 2021;105: 2755–2776.

Edwards D. C., McKee T. B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report*. No. 97(2). Fort Collins: Colorado State University; 1997. 155 p.

McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Applied Climatology: Proc. 8th Conf. (Anaheim, USA, 17–22 January 1993)*. P. 179–184.

McMahon T. A., Peel M. C., Lowe L., Srikanthan R., McVicar T. R. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2013;17:1331–1363. doi: 10.5194/hess-17-1331-2013

Normatov P. I., Armstrong R., Normatov I. Sh. Assessment of the influence of climate change on snow ice resources and hydrology of Mountain Pamir Rivers. *Sustain. Develop. Mount. Terr.* 2019;11(3):295–304. doi: 10.21177/1998-4502-2019-11-3-295-304

Normatov I. Sh., Armstrong R., Normatov P. I. Comparative estimation of river runoff formation in the climatic zones of Gorn Pamir. *Sustain. Develop. Mount. Terr.* 2020;12(3):366–372. doi: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-366-372

Normatov I. Sh., Shermatov N., Normatov P. I., Markaev B. A., Normatov A. I. Formation and changes in the chemical composition of water along the bed of the transboundary Panj River (Tajikistan). *Geosfernye*

issledovaniya = *Geosphere Studies*. 2023;4:65–76.
(In Russ.). doi: 10.17223/25421379/29/4

Pavlova A. I. Estimation of meteorological drought on the basis of climatic standardized index of precipitation and evaporability. *Agrarnyi vestnik Urala* = *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024;24(5):605–616. (In Russ.). doi: 10.32417/1997-4868-2024-24-05-605-616

Pörtner H. O., Roberts D., Tignor M. M. B. et al. (eds.). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press; 2022. 3056 p. doi: 10.1017/9781009325844

Strashnaya A. I., Birman B. A., Bereza O. V. Features of the 2012 drought in the Urals and Western Siberia and its impact on the yield of spring grain crops. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* = *Hydrometeorological Research and Forecasts*. 2018;2(368): 154–169. (In Russ.)

Vicente-Serrano S. M., Beguería S., López-Moreno J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 2010;23:1696–1718. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1

Zubov A. R., Zubova L. G. Hydrological features of the rivers of the basins of the Azov and Black Seas. Lugansk: FLP Palchak A. V.; 2017. 230 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 02.11.2024; принята к публикации / accepted: 23.04.2025.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Норматов Ином Шерович

чл.-корр. НАН Таджикистана, д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и климатологии физического факультета

e-mail: inomnor@mail.ru

Рахимзода Алишер Орзу

канд. физ.-мат. наук, доцент, директор

e-mail: rao8787@mail.ru

Сафарова Зарнигор Исломовна

сотрудник Агентства по гидрометеорологии Таджикистана

e-mail: z.safarova1995@mail.ru

Сабурова Гурдофарид Накимовна

ассистент кафедры

e-mail: umarova52@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Normatov, Inom

Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of Department

Rahimzoda, Alisher Orzu

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Director

Safarova, Zarnigor

Employee, Agency for Hydrometeorology of Tajikistan

Saburova, Gurdofarid

Assistant