

Научная статья

УДК [551.513: 632.112](575)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-430-451

## **Термодинамические характеристики атмосферной засухи и циркуляционные условия ее формирования на юге Узбекистана**

***Исроил Мухиддинович Махмудов<sup>1</sup>, Сардор Улугбек угли Бегматов<sup>1</sup>,  
Фируз Бахраметдинович Сафаров<sup>2, 3</sup>, Виктор Николаевич Абанников<sup>3</sup>,  
Олег Леонидович Бабушкин<sup>1</sup>, Замира Султанкуловна Усманова<sup>5</sup>,  
Бахтияр Махаматжанович Холматжанов<sup>1, 4</sup>***

<sup>1</sup> Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Ташкент, Узбекистан, b.xolmatjanov@nuu.uz

<sup>2</sup> Агентство гидрометеорологической службы, Ташкент, Узбекистан

<sup>3</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербурга, Россия

<sup>4</sup> Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан

<sup>5</sup> Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан

*Аннотация.* В статье приводится анализ термодинамических условий, способствующих формированию атмосферной засухи (АЗ) в южных районах Узбекистана (Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областях) в теплое полугодие в период с 1991 г. по 2024 г., на основе разработанного узбекскими учеными индекса атмосферной засухи — термогигрометрического коэффициента сухости воздуха (ТГК). Приводятся границы градаций значений коэффициента для слабой, умеренной, сильной и очень сильной атмосферной засухи. Рассмотрены циркуляционные условия, обуславливающие возникновение атмосферной засухи, такие как основные воздушные массы над территорией Узбекистана и типы синоптических процессов Средней Азии, обуславливающие их формирование. Тенденции изменений временных рядов продолжительности АЗ исследованы с помощью статистического непараметрического теста Манн-Кендалла. Проведен сравнительный анализ индекса ТГК и дефицита давления водяного пара.

*Ключевые слова:* атмосферная засуха, термодинамические характеристики, термогигрометрический коэффициент сухости воздуха, воздушная масса, тип синоптического процесса, тест Манн-Кендалла.

*Благодарности:* Исследование выполнено в рамках проекта АЛ-5721122072 «Комплексное использование данных наземных наблюдений и данных геостационарных метеорологических спутников о солнечной радиации для устойчивого развития сельского хозяйства, водных и энергетических ресурсов» при финансовой поддержке Агентства инновационного развития при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан. Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам, рекомендации которых позволили существенно улучшить содержание статьи.

---

© Махмудов И. М., Бегматов С. У., Сафаров Ф. Б., Абанников В. Н., Бабушкин О. Л., Усманова З. С., Холматжанов Б. М., 2025

*Для цитирования:* Махмудов И. М., Бегматов С. У., Сафаров Ф. Б., Абанников В. Н., Бабушкин О. Л., Усманова З. С., Холматжанов Б. М. Термодинамические характеристики атмосферной засухи и циркуляционные условия ее формирования на юге Узбекистана // Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 430—451. doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-430-451.

Original article

## **Thermodynamic characteristics of atmospheric drought and circulation conditions of its formation in the south of Uzbekistan**

***Isroil M. Makhmudov<sup>1</sup>, Sardor U. Begmatov<sup>1</sup>, Firuz B. Safarov<sup>2, 3</sup>,  
Viktor N. Abannikov<sup>3</sup>, Oleg L. Babushkin<sup>1</sup>, Zamira S. Usmanova<sup>5</sup>,  
Bakhtiyar M. Kholmatjanov<sup>1, 4</sup>***

<sup>1</sup> Hydrometeorological Research Institute, Tashkent, Uzbekistan, b.xolmatjanov@nuu.uz

<sup>2</sup> Hydrometeorological service Agency, Tashkent, Uzbekistan

<sup>3</sup> Russian State Hydrometeorological University, Saint Peterburg, Russia

<sup>4</sup> National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, Uzbekistan

<sup>5</sup> Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Almaty, Kazakhstan

*Summary.* The article presents an analysis of thermodynamic and circulation conditions in the atmosphere that contribute to the formation of atmospheric drought (AD) in the south of Uzbekistan — Kashkadarya and Surkhandarya regions. The initial data in the work were obtained from 15 meteorological stations in the warm half-year (March-October) in the period 1991-2024, located in various physical and geographical conditions. The analysis is based on the atmospheric drought index developed by Uzbek scientists — the thermohygroscopic coefficient of air dryness (THC), which includes meteorological data on maximum air temperature and dew point temperature. THC is measured in ppm (%). The boundaries of atmospheric drought gradations are given: weak — 76—90 %, moderate — 91—105 %, strong — 106—120 %, very strong — more than 120 %.

A comparative analysis of observation data from meteorological stations for basic climatic periods showed an increase in air temperature in the last 30-year period relative to the basic climatic period (1961—1990). The dependence of long-term average air temperature on the altitude of the area is noted. Unlike air temperature, changes of precipitation from period to period are not large. Most of the precipitation falls in the cold half of the year. The summer period, especially August, is distinguished in flat areas by an almost complete absence of precipitation.

An analysis of the formation of droughts of varying intensity depending on the season and air temperature in various physical and geographical regions is carried out. It is noted that in all the seasons under consideration, atmospheric drought is formed under fairly wide ranges of temperature and humidity. An analysis of the relationship between droughts of varying intensity under the main air masses formed both over the territory of Central Asia itself and beyond its borders is carried out. It is shown that regardless of the intensity of droughts, they are most often formed when the tropical Turanian air mass prevails over the territory of Uzbekistan, and in second place — the moderate Turanian air mass.

The trends in the time series of AD duration were studied using the statistical nonparametric Mann-Kendall test. The test values for the total number of days with AD were positive and statistically significant, the growth rates ranged from 0.840 to 2.455 days/year. A statistically significant negative trend of –0,615 days/year was noted at the Mingchukur weather station.

A comparative analysis of the THC index and the water vapor pressure deficit was carried out. The analysis of the obtained results showed that in spring and autumn, the number of drought cases according to

the water vapor pressure deficit is no more than 10.0 % of the number of cases according to the THC index, and in the summer season — 51.2 %.

*Keywords:* atmospheric drought, thermodynamic characteristics, thermohygro-metric coefficient of air dryness, air mass, type of synoptic process, Mann-Kendall test.

*Acknowledgments:* The study was carried out within the framework of the project AL-5721122072 “Integrated use of data from ground observations and solar radiation data from geostationary meteorological satellites for sustainable development of agriculture, water and energy resources” with the financial support of the Agency for Innovative Development under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan.

*For citation:* Makhmudov I. M., Begmatov S. U., Safarov F. B., V. N. Abannikov, Babushkin O. L., Usmanova Z. S., Kholmatjanov B. M. Thermodynamic characteristics of atmospheric drought and circulation conditions of its formation in the south of Uzbekistan. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydro-meteorology and Ecology*. 2025;(80):(430—451). doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-430-451. (In Russ.).

## Введение

К опасным гидрометеорологическим явлениям относятся те, которые продолжают длительные периоды времени и имеют большую площадь распространения (засухи, наводнения, лесные пожары и др.) [1]. Среди них засуха является наиболее масштабным явлением, она может наблюдаться на территории, составляющей большую часть любого континента, и длиться несколько лет.

Согласно данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), продолжающееся изменение климата с высокой степенью достоверности в глобальном масштабе повысило вероятность возникновения разных экстремальных событий, в том числе увеличение волн жары, сопровождающихся засухами. Различаются метеорологическая, почвенная, сельскохозяйственная и экологическая засуха в зависимости от ее возникновения в пределах той или иной геосфер [2].

Засухи, как и другие экстремальные явления, возникают в сочетании термодинамических и динамических процессов. Обусловленные тепло- и влагообменом в атмосфере термодинамические процессы, влияющие на влажность воздуха, температуру и радиацию и формирующие режим осадков и испарения, способствуют возникновению засухи. Динамические процессы, в свою очередь, важны для объяснения изменчивости засухи в различных временных масштабах [2].

Узбекистан расположен в центре Евразийского материка и удален от источников влаги. В условиях континентального субтропического климата с относительно небольшим количеством осадков, выпадающих преимущественно в холодное полугодие, в период знойного лета длительная засуха представляет собой обычное явление. Искусственное орошение снижает отрицательное влияние засух на произрастание растительности и формирование урожая. Однако в отдельные годы засухи пагубно влияют на сельскохозяйственные поливные культуры и богару, значительно снижая урожайность и приводя к выгоранию пастбищной растительности. Данное обстоятельство определяет актуальность проведенного исследования.

Целью данного исследования является выявление термодинамических и циркуляционных условий, способствующих формированию атмосферной засухи в Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областях, расположенных на юге Узбекистана, в теплое полугодие в период с 1991 г. по 2024 г.

### Объект и методы исследования, исходные материалы

Территории Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей Узбекистана имеют достаточно разнообразные формы рельефа. Согласно физико-географическому районированию Узбекистана его территория располагается в пределах Туранской физико-географической провинции, которая в связи с неоднородностью рельефа делится на равнинную и предгорно-горную подпровинции [3]. Западная часть территории Кашкадарьинской области, включающая Каршинскую степь, относится к равнинной подпровинции Туранской провинции, а ее восточная часть с Китаб-Шахрисябзской котловиной, Гисарскими и Зерафшанскими горами и предгорными склоновыми равнинами — к предгорно-горной подпровинции. Сурхандарьинская область, расположенная в самой южной части Узбекистана, полностью входит в состав предгорно-горной подпровинции (рис. 1).

В Кашкадарьинской области функционируют 9 метеостанций Узгидромета, а в Сурхандарьинской области — 6 (рис. 1, табл. 1). В качестве исходных данных использованы ряды их наблюдений в теплый период года (март-октябрь) за период с 1991 г. по 2024 г. Значения ТКГ определялись по дневным максимальным температурам воздуха и соответствующим им значениям температуры точки росы. Типы воздушных масс (ВМ), приводящие к формированию той или иной градации АЗ, определялись с помощью календарей СП Средней Азии.

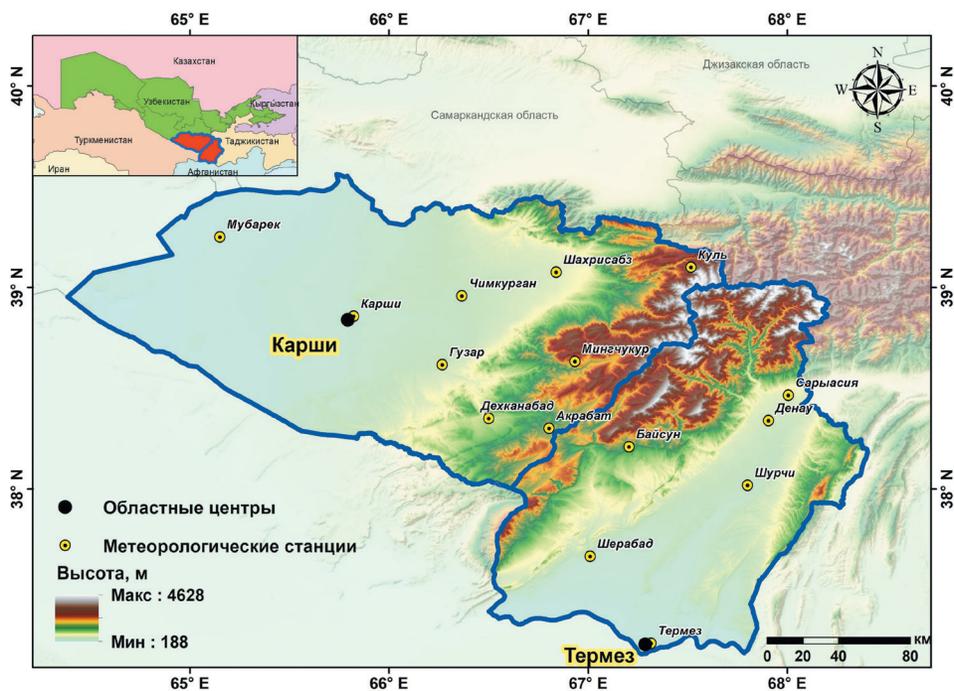


Рис. 1. Карта-схема расположения Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей.

Fig. 1. Location map-scheme of the Kashkadarya and Surkhandarya regions.

Метеорологические станции Узгидромета,  
расположенные в Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областях  
Uzhydromet meteorological stations located in Kashkadarya and Surkhandarya regions

№	Станция	Высота над уровнем моря, м	№	Станция	Высота над уровнем моря, м
Кашкадарьинская область			Сурхандарьинская область		
1	Мубарек	286	1	Шерабад	117
2	Карши	370	2	Термез	313
3	Чимкурган	466	3	Шурчи	449
4	Гузар	524	4	Денау	553
5	Шахрисабз	627	5	Сарьасия	586
6	Дехканабад	938	6	Байсун	1241
7	Акрабат	1599			
8	Мингчукур	2130			
9	Куль	2161			

Индексы засухи могут варьироваться от изменения отдельных параметров (осадки, влажность почвы, сток, эвапотранспирация) до индексов, объединяющих эти параметры. Оценка условий засухи основана на изменениях физических условий и показателей, имеющих непосредственное отношение к засухам: дефицит осадков; избыток потребности в испарении в атмосфере (atmospheric evaporative demand — AED); дефицит влажности почвы; гидрологический дефицит; атмосферные индексы, объединяющие осадки и AED [2]. В качестве индексов атмосферной засухи (АЗ) обычно применяются переменные и индексы термодинамических процессов, такие как дефицит давления водяного пара, фактическая и потенциальная эвапотранспирация или их сочетание, потребность атмосферы к испарению или индекс суточного дефицита эвапотранспирации [4—7].

Индексы атмосферной засухи отражают меру потенциального стресса растительности, возникающего из-за дефицита между доступной водой и увеличением AED. В засушливых условиях увеличение AED усиливает водную нагрузку на растения. При наступлении АЗ поступление воды в растения через корневые системы затрудняется, расход влаги на транспирацию начинает превосходить её приток из почвы, водонасыщенность тканей падает, нормальные условия фотосинтеза и углеродного питания нарушаются. В результате может наступить гибель растений, увеличивается риск возникновения крупных лесных пожаров [2].

В данном исследовании в качестве индекса атмосферной засухи использован термогигрометрический коэффициент сухости воздуха (ТГК), предложенный узбекскими учеными [8]:

$$K = \frac{T - \tau}{T} = \frac{\Delta}{T},$$

где  $K$  — термогигрометрический коэффициент сухости воздуха (‰),  $T - \tau = \Delta$  — дефицит точки росы,  $T$  — температура воздуха,  $\tau$  — температура точки росы. Все температурные показатели измеряются в Кельвинах.

Эта величина зависит как от влагосодержания воздуха, так и от его температуры и показывает, насколько удален водяной пар от состояния насыщения при данном его содержании при заданной температуре воздуха. Пределы изменения этой величины в реальных условиях лежат в пределах от 0 до 150 %. В указанных пределах ТГК может изменяться как в холодных полярных, так и в жарких пустынных районах. Выбор критериальных значений коэффициента для слабой, умеренной, сильной и очень сильной АЗ выполнен с учетом угнетающего воздействия температуры воздуха и его влажности на различные сельскохозяйственные культуры (капуста, картофель, бахчевые культуры, хлопчатник и др.) в соответствии с диапазонами изменения внешних условий. Установленные на основе тщательного анализа связи между температурой воздуха, давлением водяного пара и значениями ТГК для различных физико-географических условий Узбекистана (горы, оазис, пустыня) критерии АЗ имеют следующие пределы: слабая АЗ — ТГК в пределах 76—90 %, умеренная АЗ — 91—105 %, сильная АЗ — 106—120 %, очень сильная (экстремальная) АЗ — более 120 % [9].

Для исследования тенденций во временных рядах продолжительности АЗ был использован статистический непараметрический тест Манна-Кендалла [10—12]. Этот метод широко применяется для выявления и анализа монотонных тенденций в сериях гидрометеорологических данных [13—16]. Согласно тесту Манна-Кендалла, нулевая гипотеза  $H_0$  предполагает, что тенденции нет (данные независимы и упорядочены случайным образом), и эта гипотеза проверяется против альтернативной гипотезы  $H_1$ , которая предполагает, что тенденция есть. Монотонный восходящий/нисходящий тренд означает, что переменная последовательно увеличивается/уменьшается во времени, но тренд может быть или не быть линейным. Тест Манна-Кендалла может быть использован вместо параметрического линейного регрессионного анализа, который применяется для проверки того, отличается ли наклон предполагаемой линии линейной регрессии от нуля. Регрессионный анализ требует, чтобы данные из подобранной линии регрессии были нормально распределены; предположение, не требуемое тестом Манна-Кендалла, то есть тест Манна-Кендалла является свободным от распределения (непараметрическим) тестом. Тестовая статистика  $Z_s$  используется как мера значимости тренда. Фактически, эта тестовая статистика используется для проверки нулевой гипотезы  $H_0$  [10, 11, 13, 17]. Для количественной оценки величины (наклона) и значимости трендов во временных рядах был применен непараметрический метод Тейла-Сена [18, 19].

## Результаты исследования

### *Режим температуры воздуха и осадков*

Изменения в многолетнем режиме температуры воздуха и осадков на территории областей выявлены на основе сравнительного анализа данных наблюдений метеорологических станций за базовые климатические периоды с 1961 г. по 1990 г. и с 1991 г. по 2020 г. (рис. 2, 3).

В качестве примера на рис. 2 приведены многолетние среднемесячные температуры воздуха на метеостанциях Мубарек, Термез и Мингчукур. Анализ данных

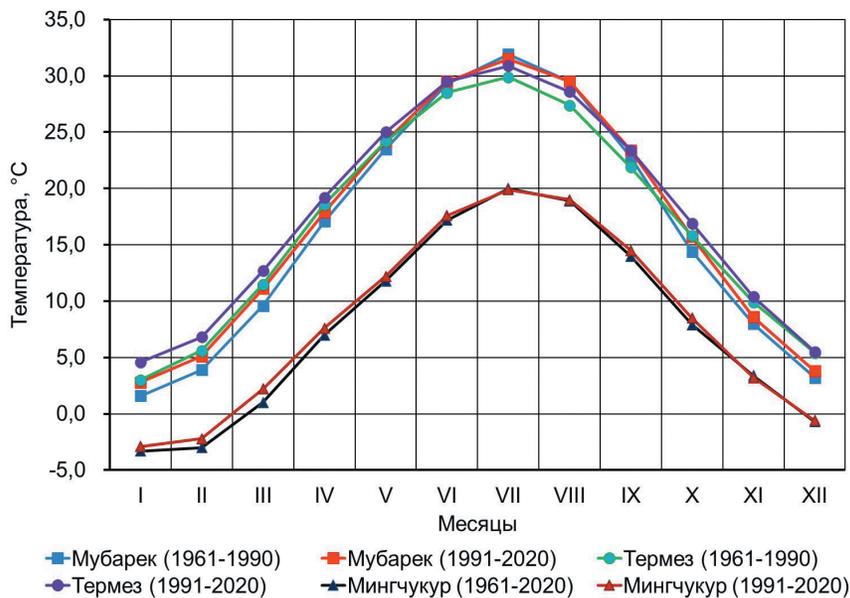


Рис. 2. Многолетние среднemesячные температуры воздуха в Мубарекe, Термезе и Мингчукуре в различные климатические периоды, °C.

Fig. 2. Long-term average monthly air temperatures in Mubarek, Termez and Mingchukur in different climatic periods, °C.

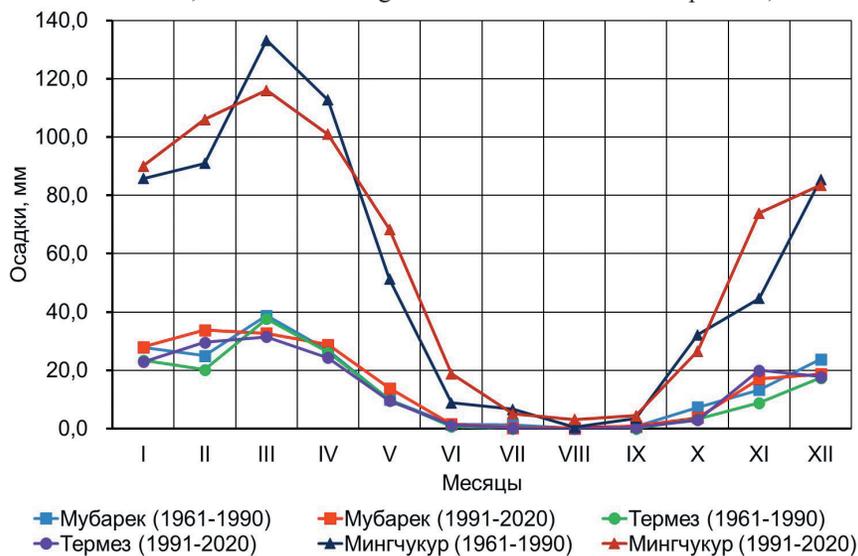


Рис. 3. Многолетние среднemesячные осадки в Мубарекe, Термезе и Мингчукуре в различные климатические периоды, мм.

Fig. 3. Long-term average monthly precipitation in Mubarek, Termez and Mingchukur in different climatic periods, mm.

свидетельствует, что от периода к периоду по всей исследуемой территории средняя многолетняя температура воздуха увеличивалась. Прирост температуры воздуха в последний тридцатилетний климатический период (1991—2020 гг.) относительно базового климатического периода (1961—1990 гг.) колеблется в пределах от 0,4 °С в Минчукуре до 0,8 °С в Карши и Шахрисабзе (Кашкадарьинская область) и от 0,7 °С в Шерабаде и Байсуне до 1,0 °С в Термезе (Сурхандарьинская область). Многолетняя средняя температура воздуха в горных районах Кашкадарьинской области составляет 7,0—12,0 °С, а в равнинной и предгорных районах — 12,0—17,0 °С. В горных районах Сурхандарьинской области (Байсун) многолетняя средняя температура воздуха за период с 1991 г. по 2020 г. составила 13,7 °С, а на остальной территории области — 17,0—19,0 °С. Внутригодовое распределение многолетней средней температуры свойственно континентальному типу: самым жарким месяцем является июль, а самым холодным — январь.

Как и в случае с температурой воздуха, количество осадков имеет четко выраженную зависимость от высоты. В отличие от температуры воздуха изменения в количестве осадков от периода к периоду небольшие. В степной зоне Кашкадарьинской области выпадают в среднем 180—250 мм осадков в год, а в горных районах — до 750 мм. В Сурхандарьинской области осадки выпадают меньше — от 180 мм до 480 мм в год (рис. 3). Основная часть осадков выпадает в холодное полугодие. Летний период, особенно август, отличается в равнинных районах практически отсутствием осадков.

### Термодинамические характеристики атмосферной засухи

Графики связи между температурой воздуха, температурой точки росы и значениями ТГК для АЗ различной интенсивности, построенные на основе всех возможных случаев ее наступления за исследуемый тридцатичетырехлетний период в зоне орошаемого земледелия Кашкадарьинской (рис. 4 а, б, в) и Сурхандарьинской (рис. 4 г, д, е) областей представлены на рис. 4, а на рис. 5 — в степной (рис. 5 а, б, в) и горной (рис. 5 г, д, е) зонах Кашкадарьинской области. Из рисунков видно, что в Чимкургане и Термезе (оазис) начало АЗ наступает весной при температуре воздуха выше 10 °С (рис. 4 а, г), в Мубареке (степь) — выше 5 °С, а в Минчукуре (горы) — даже при отрицательных значениях, выше –2 °С (рис. 5 а, з).

Летом в оазисах и на степной территории слабая и умеренная АЗ возникает при температуре воздуха выше 25 °С (рис. 4 и 5 б, д), в горной зоне — выше 17 °С (рис. 5 б, д), а при температуре воздуха выше 30 °С (в горах выше 25 °С) начинает формироваться сильная и очень сильная АЗ.

Осенью, с понижением температуры воздуха, частота случаев АЗ уменьшается. Слабая и умеренная АЗ в оазисах и в степи наблюдаются при температуре воздуха 15—17 °С (рис. 4 и 5 в), а в горной территории при 7—8 °С (рис. 5 е).

Результаты детального анализа пределов изменения термодинамических характеристик воздуха, при которых формируется АЗ различной интенсивности, для рассмотренных выше зон, приведены в табл. 2. Во все сезоны, в зависимости от месяца, АЗ формируется при достаточно широких диапазонах температуры и

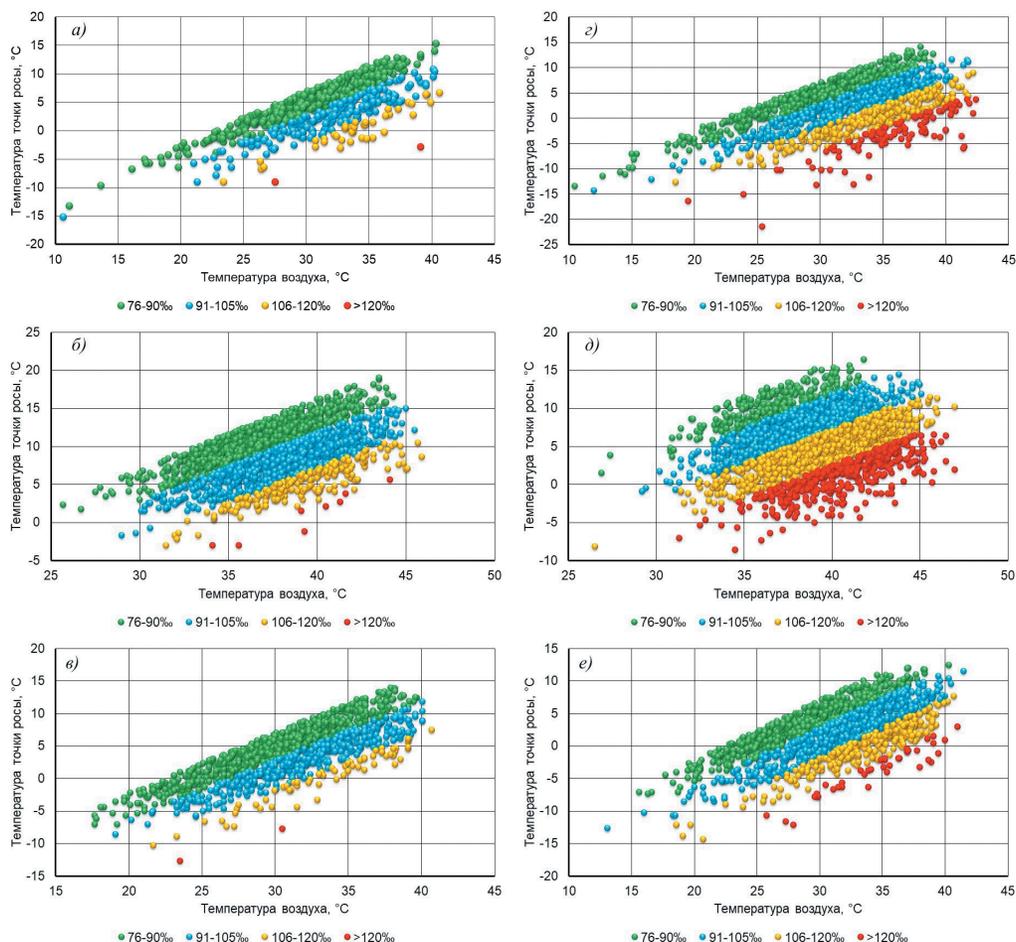


Рис. 4. Связь интенсивности атмосферной засухи с сочетанием температуры воздуха и температуры точки росы в Чимкургане (а, б, в) и Термезе (з, д, е).

а, з — весна, б, д — лето, в, е — осень (сентябрь-октябрь). 76—90 ‰ — слабая АЗ, 91—105 ‰ — умеренная АЗ, 106—120 ‰ — сильная АЗ, > 120 ‰ — очень сильная АЗ.

Fig. 4. Relationship of AD intensity with the combination of air temperature and dew point in Chimkurgan (a, б, в) and Termez (z, d, e).

а, з — spring, б, д — summer, в, е — autumn (September-October). 76—90 ‰ — weak AD, 91—105 ‰ — moderate AD, 106—120 ‰ — strong AD, > 120 ‰ — very strong AD.

влажности. Так, в Чимкургане, расположенном рядом с крупным водным объектом — Чимкурганским водохранилищем, слабая АЗ в марте формируется при следующих диапазонах: максимальной температуры воздуха 11,1—30,5 °C и температуры точки росы -13,2—7,0 °C, а в мае при диапазонах 23,0—40,3 °C и -1,2—15,4 °C соответственно. Многолетняя средняя продолжительность АЗ этой интенсивности составляет 2 дня в марте, 3 дня в апреле и 7 дней в мае. В летний

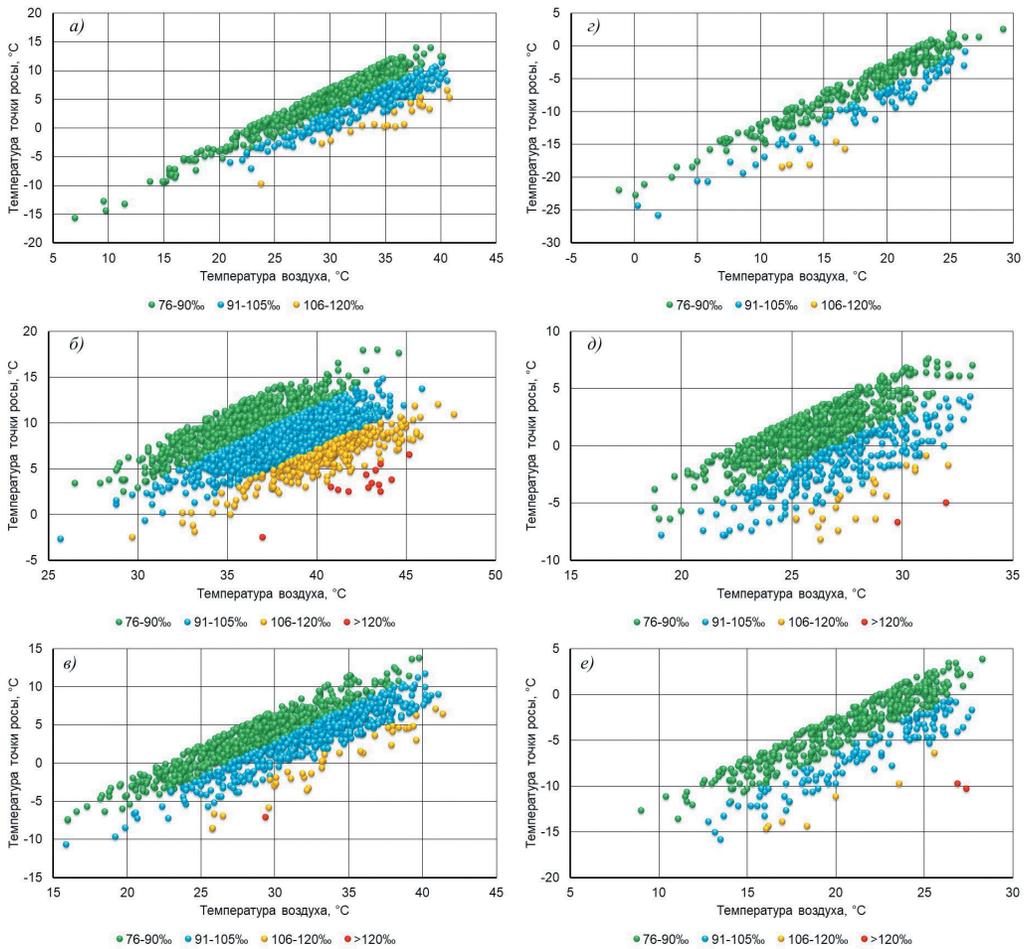


Рис. 5. Связь интенсивности атмосферной засухи с сочетанием температуры воздуха и температуры точки росы в Мубареке (*a, б, в*) и Мингчукуре (*z, д, е*).

*a, z* — весна, *б, д* — лето, *в, е* — осень (сентябрь-октябрь). 76—90 ‰ — слабая АЗ, 91—105 ‰ — умеренная АЗ, 106—120 ‰ — сильная АЗ, > 120 ‰ — очень сильная АЗ.

Fig. 5. Relationship of AD intensity with the combination of air temperature and dew point in Mubarek (*a, б, в*) and Mingchukur (*z, д, е*).

*a, z* — spring, *б, д* — summer, *в, е* — autumn (September-October). 76—90 ‰ — weak AD, 91—105 ‰ — moderate AD, 106—120 ‰ — strong AD, > 120 ‰ — very strong AD.

сезон нижние и верхние пределы диапазонов термодинамических характеристик увеличиваются. Заметно увеличивается и её продолжительность, составляя 11—13 дней. Осенью, с понижением температуры воздуха, происходит обратный процесс. Пределы диапазонов термодинамических характеристик и продолжительность АЗ уменьшаются. В конце теплого периода — октябре, слабая АЗ возникает при максимальных температурах воздуха 17,7—37,9 °С и температуре

точки росы  $-7,1-13,9$  °C, а ее многолетняя средняя продолжительность составляет 9 дней. Умеренная АЗ формируется в условиях более высоких температур воздуха, низких значений температуры точки росы и больших дефицитов давления водяного пара, чем в случае слабой АЗ, а их многолетняя средняя продолжительность оказалась меньше весной и осенью — и больше в летний сезон. Сильная АЗ — явление достаточно редкое, ее многолетняя средняя продолжительность не превышает 3 дней в году даже в летние месяцы. Она формируется при условиях максимальной температуры воздуха  $21,7$  °C и температуры точки росы  $-10,3$  °C в октябре, температуры воздуха  $45,9$  °C и температуры точки росы  $10,4$  °C в июне. Очень сильная АЗ в Чимкургане формируется не каждый год. Например, в течение всего периода исследования в марте и мае она наблюдалась только по одному разу.

Таблица 2

Диапазоны изменения максимальной температуры воздуха ( $\Delta T_x$ ), температуры точки росы ( $\tau$ ), дефицита точки росы ( $\Delta\tau$ ) и многолетнего среднего числа дней ( $N$ ) при различной интенсивности АЗ

Ranges of change in maximum air temperature ( $\Delta T_x$ ), dew point temperature ( $\tau$ ), maximum vapor pressure deficit ( $\Delta\tau$ ), and long-term average numbers of days ( $N$ ) at different intensities of AD

Месяц	$\Delta T_x$ , °C	$\tau$ , °C	$\Delta\tau$ , °C	$N$	$\Delta T_x$ , °C	$\tau$ , °C	$\Delta\tau$ , °C	$N$
Чимкурган								
слабая АЗ (76—90 ‰)				умеренная АЗ (91—105 ‰)				
III	11,1—30,5	-13,2—7,0	22,1—27,1	2	10,6—35,2	-15,1—5,9	25,7—31,5	1
IV	16,1—36,6	-6,7—12,0	22,3—27,4	3	22,6—37,1	-4,7—8,6	27,0—32,0	1
V	23,0—40,3	-1,2—15,4	22,9—27,7	7	25,1—40,2	-4,1—10,9	27,2—32,6	3
VI	27,5—43,5	3,4—16,6	23,2—28,3	11	29,8—44,2	-1,4—12,8	27,6—33,0	10
VII	29,3—44,3	3,0—18,8	23,2—28,3	12	30,8—45,0	2,3—15,0	27,4—33,2	13
VIII	25,7—43,8	1,7—19,0	23,2—28,3	13	29,0—45,5	-1,7—13,9	27,6—33,4	11
IX	22,4—39,7	-3,2—13,8	22,9—28,1	13	23,5—40,1	-4,1—11,8	26,9—32,6	9
X	17,7—37,9	-7,1—13,9	22,3—27,6	9	19,1—37,6	-8,6—8,4	26,6—31,8	4
сильная АЗ (106—120 ‰)				очень сильная АЗ (> 120 ‰)				
III	26,3—34,4	-6,7—-1,2	31,7—35,7	0	27,5	-9,0	36,5	0
IV	23,4—37,3	-9,0—3,8	32,4—36,2	0	—	—	—	—
V	30,7—40,6	-2,8—6,7	32,2—36,5	1	39,1	-2,8	41,9	0
VI	31,5—45,9	-3,0—10,4	32,5—37,8	3	34,1—41,6	-3,0—3,8	37,1—40,5	0
VII	33,3—45,1	-1,7—10,3	32,5—38,0	2	41,3—44,1	2,7—5,6	38,5—38,6	0
VIII	34,2—44,8	0,9—10,0	32,5—36,8	2	35,6—39,1	-3,0—1,5	37,6—38,6	0
IX	28,7—40,7	-4,4—7,4	32,3—36,2	1	—	—	—	—
X	21,7—36,1	-10,3—3,0	31,6—34,6	1	23,5—30,5	-12,7—-7,8	36,2—38,3	0

В зависимости от физико-географических условий и метеорологического режима АЗ различной интенсивности в Термезе, Мубареке и Мингчукуре по месяцам имеет подобное распределение с отличающимися пределами термодинамических характеристик. Следует подчеркнуть, что в Чимкургане и Мубареке преобладают

условия слабой и умеренной, в Термезе — умеренной и сильной, а Мингчукуре — слабой АЗ. Главной отличительной чертой формирования АЗ различной интенсивности является следующее: слабая АЗ в степной зоне и оазисах формируется при интервалах дефицита точки росы 22,0—28,0 °С, умеренная — 27,0—33,0 °С, сильная — 32,0—38,0 °С и очень сильная — 36,0 °С и больше, а в горной зоне 21,0—27,0 °С, умеренная — 25,0—32,0 °С, сильная — 30,0—37,0 °С и очень сильная — 36,5 °С и больше, соответственно (табл. 2).

### Циркуляционные условия формирования атмосферной засухи и их продолжительность

Как известно, термодинамические свойства воздуха обусловлены динамическими процессами, в том числе и условиями циркуляции атмосферы. Формы циркуляции атмосферы над Средней Азией и сопредельными районами разнообразны. Исследование изменений этих форм циркуляции имеет прикладное значение в выявлении циркуляционных причин ряда метеорологических явлений. Современная классификация синоптических процессов (СП), охватывающая формы региональной циркуляции атмосферы Средней Азии, состоит из следующих 17 типов: 1 — южнокаспийский циклон, 2 — мургабский циклон, 3 — верхнеамударьинский циклон, 4 — широкий вынос тёплого воздуха, 5 — северо-западное холодное вторжение, 6 — северное холодное вторжение, 7 — волновая деятельность на холодном фронте, 8 — малоподвижный циклон над Средней Азией, 9 — юго-западная периферия антициклона, 9а — юго-восточная периферия антициклона, 9б — южная периферия антициклона, 10 — западное вторжение, 11 — летняя термическая депрессия, 12 — малоградиентное поле повышенного давления, 13 — малоградиентное поле пониженного давления, 14 — западный циклон, 15 — ныряющий циклон [20].

Основными воздушными массами, приходящими в Узбекистан или формирующимися над его территорией в теплое полугодие и приводящими к возникновению АЗ, являются:  $T_{и}$  — иранский воздух, формирующийся над территорией Месопотамии (типы 1, 2, 8),  $T_{с}$  — тропический воздух Средиземноморья и Северной Африки (типы 4, 14),  $V_{е}$  — воздух умеренных широт, формирующийся над восточной частью европейской территории России (поступает при типах 5, 15),  $V_{с}$  — воздух умеренных широт, формирующийся над Западной Сибирью и Восточным Казахстаном в малоподвижном сибирском антициклоне (тип 6),  $V_{т}$  — воздух южной полосы умеренных широт, формирующийся в пределах Средней Азии (над Туранской низменностью) (типы 9, 9а, 9б),  $V_{ю}$  — воздух южной полосы умеренных широт, формирующийся над Балканами и Восточным Средиземноморьем (тип 0) и  $T_{т}$  — тропический воздух, формирующийся над территорией Средней Азии (над Туранской низменностью) (типы 11, 12, 13) [21]. По мере своего продвижения в Среднюю Азию эти воздушные массы трансформируются и, особенно летом, в значительной степени теряют свои характерные свойства.

Анализ показателей продолжительности АЗ различной интенсивности в зависимости от типов воздушных масс, формирование которых обуславливается циркуляционными условиями над среднеазиатским регионом, приведен в табл. 3.

Статистический анализ, выполненный на основе данных метеостанции Карши, показывает, что многолетнее среднее суммарное число дней с АЗ за исследуемый тридцатичетырехлетний период составляет 158,6 (весной — 30,5 дней, летом — 84,4 дней и осенью — 43,7 дней) дней.

Весной и осенью преобладающими являются условия слабой и умеренной АЗ, многолетние средние продолжительности (и повторяемости) которых составляют 15,9 дней (52,0 %), 9,4 дня (30,9 %) и 20,6 дней (47,0 %) и 17,1 дней (39,1 %) соответственно. Летом преобладающими являются слабая, умеренная и сильная АЗ (23,2 дня (27,5 %), 35,6 дней (42,2 %), 20,9 дней (24,7%) соответственно). В сумме за весь теплый период наибольшую продолжительность и повторяемость имеет слабая и умеренная АЗ (59,6 дней (37,6 %) и 62,1 дней (39,2 %) соответственно).

Таблица 3

Статистические характеристики продолжительности (число дней) и повторяемости (%) АЗ в различные сезоны и теплый периоде в целом в Карши

Statistical characteristics of duration (number of days) and frequency (%) of AD in different seasons and warm period in general in Karshi

Тип СП	ВМ	Число дней	с интенсивностью АЗ				Всего	%	с интенсивностью АЗ				Всего	%
			I	II	III	IV			I	II	III	IV		
			Весна (III—V)						Лето (VI—VIII)					
1, 2, 8	T <sub>И</sub>	N	48	35	9	3	95	9,2	24	24	7	0	55	1,9
		N <sub>сп</sub>	1,4	1,0	0,3	0,1	2,8		0,7	0,7	0,2	0,0	1,6	
4, 14	T <sub>С</sub>	N	4	3	0	0	7	0,7	1	0	10	8	19	0,7
		N <sub>сп</sub>	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2		0,0	0,0	0,3	0,2	0,6	
5, 15	У <sub>Е</sub>	N	9	4	1	2	16	1,5	42	43	14	3	102	3,6
		N <sub>сп</sub>	0,3	0,1	0,0	0,1	0,5		1,2	1,3	0,4	0,1	3,0	
6	У <sub>С</sub>	N	2	6	0	0	8	0,8	20	25	5	0	50	1,7
		N <sub>сп</sub>	0,1	0,2	0,0	0,0	0,2		0,6	0,7	0,1	0,0	1,5	
9, 9а, 9б	У <sub>Т</sub>	N	150	61	14	4	229	22,1	107	134	54	5	300	10,5
		N <sub>сп</sub>	4,4	1,8	0,4	0,1	6,7		3,1	3,9	1,6	0,1	8,8	
10	У <sub>Ю</sub>	N	73	38	16	3	130	12,5	130	161	66	13	370	12,9
		N <sub>сп</sub>	2,1	1,1	0,5	0,1	3,8		3,8	4,7	1,9	0,4	10,9	
11, 12, 13	T <sub>Т</sub>	N	253	173	108	17	551	53,2	464	824	554	132	1974	68,8
		N <sub>сп</sub>	7,4	5,1	3,2	0,5	16,2		13,6	24,2	16,3	3,9	58,1	
Всего		N	539	320	148	29	1036	100,0	788	1211	710	161	2870	100,0
		N <sub>сп</sub>	15,9	9,4	4,4	0,9	30,5		23,2	35,6	20,9	4,7	84,4	
%			52,0	30,9	14,3	2,8	100,0		27,5	42,2	24,7	5,6	100,0	
			Осень (IX—X)				Теплый период (III—X)							
1, 2, 8	T <sub>И</sub>	N	16	9	3	1	29	2,0	88	68	19	4	179	3,3
		N <sub>сп</sub>	0,5	0,3	0,1	0,0	0,9		2,6	2,0	0,6	0,1	5,3	
4, 14	T <sub>С</sub>	N	7	5	4	1	17	1,1	12	8	14	9	43	0,8
		N <sub>сп</sub>	0,2	0,1	0,1	0,0	0,5		0,4	0,2	0,4	0,3	1,3	
5, 15	У <sub>Е</sub>	N	44	23	5	1	73	4,9	95	70	20	6	191	3,5
		N <sub>сп</sub>	1,3	0,7	0,1	0,0	2,1		2,8	2,1	0,6	0,2	5,6	

Тип СП	ВМ	Чис- ло дней	с интенсивностью АЗ				Все- го	%	с интенсивностью АЗ				Все- го	%
			I	II	III	IV			I	II	III	IV		
6	У <sub>С</sub>	N	9	4	0	0	13	0,9	31	35	5	0	71	1,3
		N <sub>ср</sub>	0,3	0,1	0,0	0,0	0,4		0,9	1,0	0,1	0,0		
9, 9а, 9б	У <sub>Т</sub>	N	253	161	43	4	461	31,0	510	356	111	13	990	18,4
		N <sub>ср</sub>	7,4	4,7	1,3	0,1	13,6		15,0	10,5	3,3	0,4		
10	У <sub>Ю</sub>	N	82	81	20	6	189	12,7	285	280	102	22	689	12,8
		N <sub>ср</sub>	2,4	2,4	0,6	0,2	5,6		8,4	8,2	3,0	0,6		
11, 12, 13	Т <sub>Т</sub>	N	288	298	111	8	705	47,4	1005	1295	773	157	3230	59,9
		N <sub>ср</sub>	8,5	8,8	3,3	0,2	20,7		29,6	38,1	22,7	4,6		
Всего	N	N	699	581	186	21	1487	100,0	2026	2112	1044	211	5393	100,0
		N <sub>ср</sub>	20,6	17,1	5,5	0,6	43,7		59,6	62,1	30,7	6,2		
%			47,0	39,1	12,5	1,4	100,0		37,6	39,2	19,4	3,9	100,0	

*Примечание.* В числителе приведены суммы дней за период с 1991 г. по 2024 г. (N), в знаменателе — их многолетние средние значения (N<sub>ср</sub>), I — слабая АЗ, II — умеренная АЗ, III — сильная АЗ, IV — очень сильная АЗ.

Условия с АЗ вне зависимости от ее интенсивности весной формируются при типах синоптических процессов, при которых над исследуемой территорией преобладают тропические туранские (53,2 %), умеренные туранские (22,1 %), умеренные южные (12,5 %) и тропические иранские (9,2 %) воздушные массы. Летом основным типом воздушных масс, формирующим АЗ, является тропический туранский воздух, повторяемость которого составляет 68,8 %. Осенью преобладающими воздушными массами, формирующими АЗ, являются тропический туранский (47,4 %), умеренный туранский (31,0 %) и умеренный южный (12,7 %). В сумме за весь теплый период решающими для формирования АЗ являются тропические туранские (59,9 %), умеренные туранские (18,4 %) и умеренные южные (12,8 %) воздушные массы.

Вышеуказанные осредненные характеристики продолжительности АЗ имеют большую практическую значимость при оценке явления. Однако они не дают возможность проследить динамику изменений продолжительности во времени. С этой целью построены графики межгодовых изменений продолжительности АЗ в исследуемой территории (рис. 6). В качестве примера приводятся межгодовые изменения для метеостанций Мубарек (степь), Карши, Термез (оазис), Мингчукур и Байсун (горы).

Сводные результаты теста Манна-Кендалла и оценка наклона Сена для анализа продолжительности АЗ различной интенсивности представлены в табл. 4. Положительное значение Zs указывает на тенденцию роста, отрицательное значение Zs — на тенденцию убывания. Статистически значимая тенденция на уровнях значимости 0,1, 0,05 и 0,01 существует, когда |Zs| > 1,64, |Zs| > 1,96 и |Zs| > 2,58, соответственно [13]. Статистика Zs теста Манна-Кендалла по данным межгодовой изменчивости продолжительности АЗ различной интенсивности за исследуемый период показала возрастающую тенденцию продолжительности умеренной

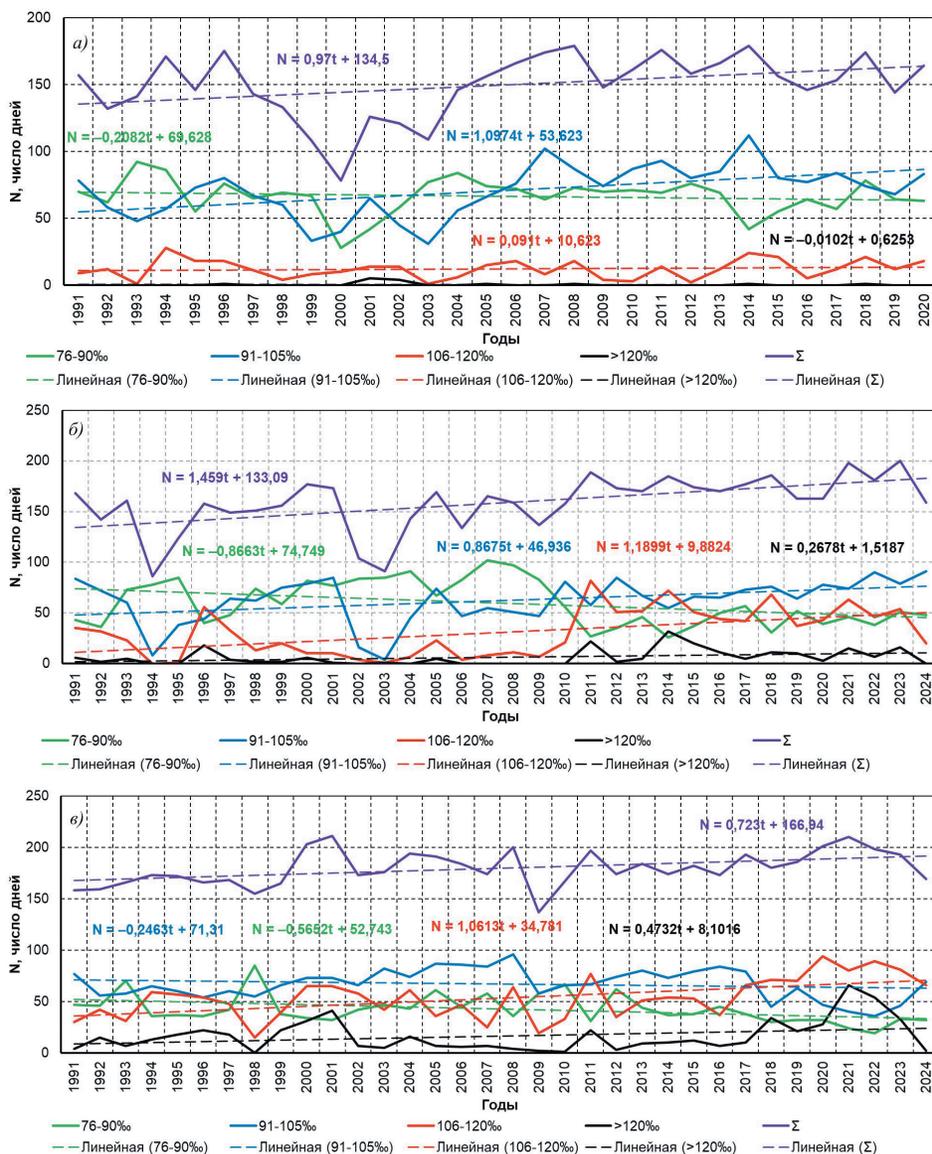


Рис. 6 (начало). Межгодовая изменчивость продолжительности АЗ в Мубареке (а), Карши (б), Термезе (в) в числе дней.

76—90 ‰ — слабая АЗ, 91—105 ‰ — умеренная АЗ,  
106—120 ‰ — сильная АЗ, > 120 ‰ — очень сильная АЗ.

Fig. 6 (beginning). Interannual change in the duration of the AD in Mubarek (a), Karshi (b), Termez (v) number of days.

76—90 ‰ — weak AD, 91—105 ‰ — moderate AD,  
106—120 ‰ — strong AD, > 120 ‰ — very strong AD.

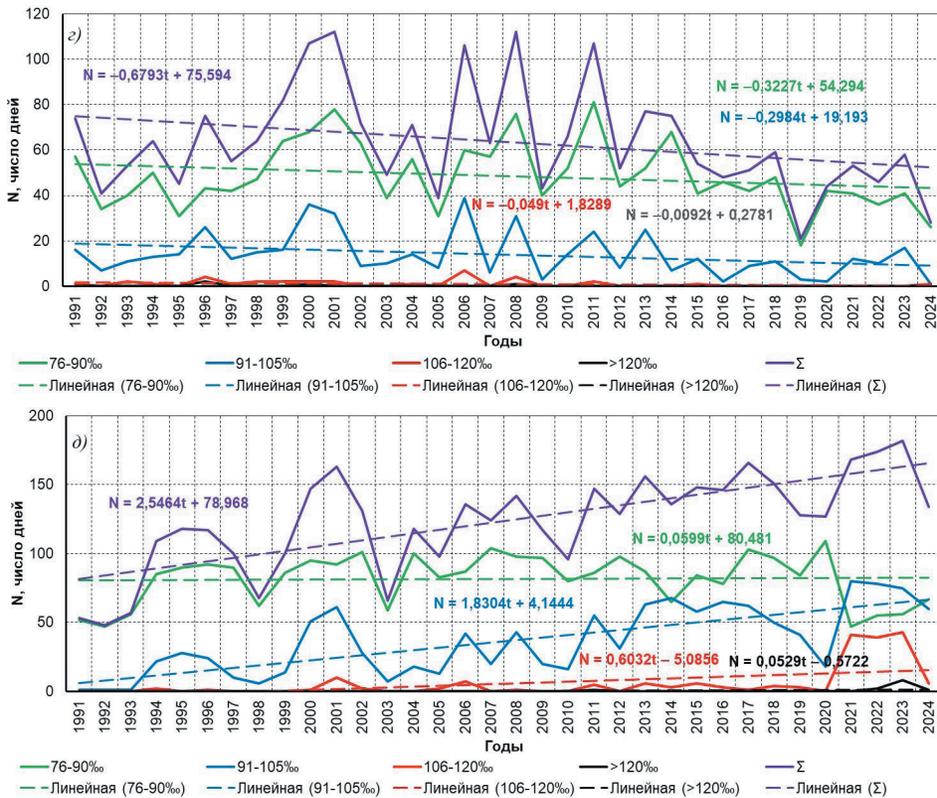


Рис. 6 (окончание). Межгодовая изменчивость продолжительности АЗ в Мингчукуре (z) и Байсуне (d) в числе дней.

76—90 ‰ — слабая АЗ, 91—105 ‰ — умеренная АЗ,  
106—120 ‰ — сильная АЗ, > 120 ‰ — очень сильная АЗ.

Fig. 6 (ending). Interannual change in the duration of the AD in Mingchukur (z) and Baysun (d) number of days.

76—90 ‰ — weak AD, 91—105 ‰ — moderate AD,  
106—120 ‰ — strong AD, > 120 ‰ — very strong AD.

и сильной АЗ на большинстве рассматриваемых метеостанций, кроме Мингчукур, на которой величины теста составили  $-2,05$  и  $-2,41$ , темпы уменьшения незначительные,  $-0,261$  и  $0,000$  дня/год соответственно. Результаты теста по данным межгодовой изменчивости продолжительности слабой АЗ показывают отрицательный тренд практически на всех станциях, значительный значимый тренд наблюдается на МС Термез ( $Z_s = -2,54$ ). Значения теста суммарного числа дней с АЗ положительны и статистически значимы и составили от  $1,84$  (МС Мубарек) до  $4,41$  (МС Байсун), темпы роста составили от  $0,840$  до  $2,455$  дня/год соответственно. На метеостанции Мингчукур отмечен статистически значимый отрицательный тренд  $-0,615$  дня/год ( $Z_s = -1,65$ ).

Значения Z теста Манна-Кендалла  
 для продолжительности (число дней) АЗ различной интенсивности (1991—2024 гг.)  
 Mann-Kendall Z test values  
 for duration (number of days) of AD of different intensities (1991—2024)

	Байсун		Мингчукур		Термез		Мубарек		Карши	
	Zs	наклон Сена	Zs	наклон Сена	Zs	наклон Сена	Zs	наклон Сена	Zs	наклон Сена
Слабая АЗ	0,22	0,097	-1,26	-0,310	-2,54*	-0,455	-1,07	-0,273	-1,60	-0,806
Умеренная АЗ	4,45***	1,885	-2,05*	-0,261	-0,04	0,000	2,59**	0,957	2,67**	1,000
Сильная АЗ	3,40***	0,148	-2,41*	0,000	3,14**	1,080	0,74	0,111	2,54*	1,033
Очень сильная АЗ	—	—	—	—	1,14	0,250	0,07	0,000	1,48	0,120
Суммарное число дней с АЗ	4,41***	2,455	-1,65+	-0,615	2,92**	0,850	1,84+	0,840	3,47***	1,250

Примечание. Проверенные уровни значимости: \*\*\* для  $p < 0,001$ , \*\* для  $p < 0,01$ , \* для  $p < 0,05$ , + для  $p \geq 0,1$ .

Выявленные тенденции подтверждают общую тенденцию потепления и увеличения повторяемости и интенсивности экстремальных явлений, в том числе засушливых периодов и засух, как в Центральной Азии, так и в большинстве регионов мира [2, 22]. Наблюдаемые тенденции согласуются с результатами региональных исследований [13, 15, 16]. Например, в [15] показано, что в пространственном отношении 70% территории Центральной Азии демонстрируют тенденцию к увеличению повторяемости засух, а в [16] выявлено, что после 2000-х годов частота и суровость засух возросли в субрегионах Центральной Азии.

### Сравнительный анализ ТГК и дефицита давления (по Л. Н. Бабушкину)

В ходе исследования был проведен сравнительный анализ примененного нами индекса ТГК и дефицита давления водяного пара. ТГК обладает высокой чувствительностью к любым временным и пространственным изменениям сухости воздуха, легко вычисляется, является одной из важнейших количественных характеристик состояния воздушных масс и представляет собой объективную характеристику погоды и климата данной территории. Его использование позволяет решать ряд практических задач, как диагностика и прогноз сухости воздуха, оценка вероятности возникновения лесных пожаров, расчет биометеорологических и агрометеорологических показателей. Кроме того, его можно использовать для целей мониторинга климатических изменений любого пространственного масштаба и при исследовании процесса опустынивания в качестве одного из ключевых параметров [8]. Согласно Л. Н. Бабушкину, для засушливого климата Средней Азии АЗ классифицируется по дефициту давления водяного пара по его максимальному значению и выделено всего 4 типа по ее интенсивности: слабая (дефицит

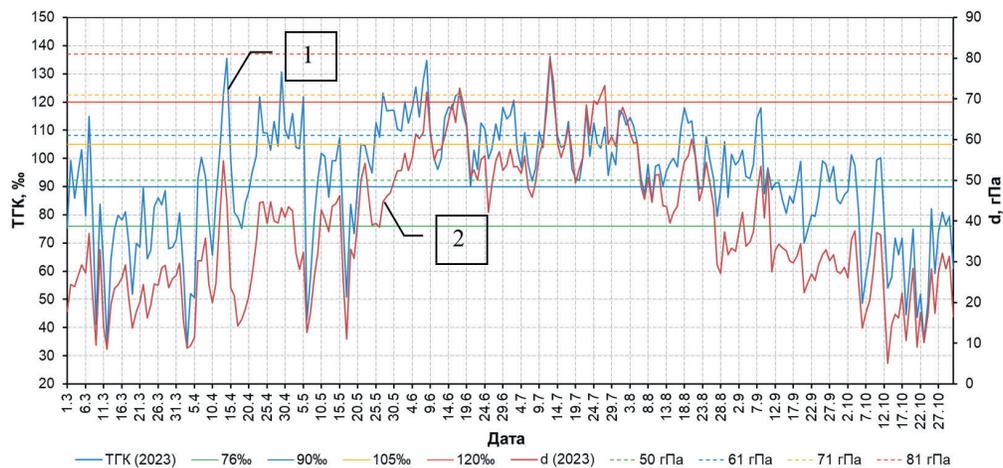


Рис. 7. Сезонная изменчивость ТГК (1) и дефицита давления водяного пара (2) на метеостанции Карши в период с 1 марта по 31 октября 2023 г.

Fig. 7. Seasonal variability of THC (1) and vapor pressure deficit (2) at the Karshi meteorological station in the period from March 1 to October 31, 2023.

влажности водяного пара в пределах 50—60 гПа), средняя (61—70 гПа), сильная (71—80 гПа), очень сильная (более 80 гПа) [4].

Рассмотрим в качестве примера временной ход ТГК и дефицита давления водяного пара в течение теплого периода 2023 г. на метеостанции Карши (рис. 7). Из графиков видно, что оба индекса имеют идентичную тенденцию изменения. Однако случаи наступления АЗ той или иной интенсивности для них совершенно отличаются. Весной и осенью при наступлении слабой (76—90 %) и умеренной (91—105 %) АЗ по индексу ТГК дефицит давления водяного пара изменяется в пределах 30—40 гПа, а в условиях сильной (106—120 %) и очень сильной (> 120 %) АЗ весной (конец апреля) дефицит давления водяного пара составляет всего 40—45 гПа, что соответствует отсутствию условий засухи. В летний сезон условиям умеренной АЗ по индексу ТГК соответствуют условия слабой АЗ по дефициту давления водяного пара (50—60 гПа). В тоже время при сильной и очень сильной АЗ по индексу ТГК дефицит давления водяного пара, главным образом, изменяется в пределах 60—70 гПа (умеренная АЗ).

Результаты статистической обработки сравнительного анализа возникновения условий АЗ по индексу ТГК и дефициту давления водяного пара в различные сезоны в период с 1991 г. по 2024 г. приведены в табл. 5. Весной и осенью, как свидетельствуют данные таблицы, при наступлении условий АЗ любой интенсивности в соответствии с индексом ТГК (1036 и 1487 случаев, соответственно), по критериям дефицита давления водяного пара условия засухи отмечались только в 100 и 73 случаях, что составляет соответственно 9,7 % и 4,9 % от случаев по первому индексу. В летний сезон совпадений условий АЗ по этим индексам засухи

больше — за исследуемый тридцатичетырехлетний период отмечалось 2870 случаев по индексу ТГК и 1470 случаев по дефициту давления водяного пара, что составляет 51,2 %.

Таблица 5

Диапазоны изменения максимального дефицита давления водяного пара ( $\Delta d_x$ ), его среднего значения ( $d_{cp}$ ) и числа случаев АЗ по индексу ТГК ( $N_{ТГК}$ ) и  $d$  ( $N_d$ ) в различные сезоны за период с 1991 г. по 2024 г. в Карши в не зависимости от интенсивности

Ranges of change in the maximum vapor pressure deficit ( $\Delta d_x$ ), its average value ( $d_{cp}$ ) and the number of AD cases according to the THC index ( $N_{ТГК}$ ) and  $d$  ( $N_d$ ) in different seasons for the period 1991—2024 in Karshi, regardless of intensity

	Весна (III—V)			Лето (VI—VIII)			Осень (X—XI)		
	$\Delta d_x$ , гПа	$d_{cp}$ , гПа	$\frac{N_{ТГК}}{N_d}$	$\Delta d_x$ , гПа	$d_{cp}$ , гПа	$\frac{N_{ТГК}}{N_d}$	$\Delta d_x$ , гПа	$d_{cp}$ , гПа	$\frac{N_{ТГК}}{N_d}$
АЗ любой интенсивности	9,6—65,4	35,6	$\frac{1036}{100}$	21,4—88,8	50,7	$\frac{2870}{1470}$	9,6—66,3	41,2	$\frac{1487}{73}$

### Заклучение

Такое неблагоприятное метеорологическое явление как засуха, в том числе и атмосферная, приносящая серьезный ущерб сельскому хозяйству, является обычным событием на территории Узбекистана. Наиболее неблагоприятные условия создаются в Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областях, расположенных на юге Узбекистана. Использованный в ходе исследования термогигрометрический коэффициент сухости воздуха (ТГК) и полученные на его основе результаты показали, что индекс может быть применен для условий аридных и полуаридных территорий.

В зависимости от физико-географических условий (степь, оазис, горы) и метеорологического режима в течение сезонов и теплого периода в целом может возникать атмосферная засуха любой интенсивности. Преобладающими в степной зоне являются условия слабой и умеренной, в оазисах — умеренной и сильной, а в горах — засуха слабой интенсивности.

Исследование межгодовой изменчивости продолжительности атмосферной засухи показало тенденцию убывания продолжительности слабой и возрастания продолжительности умеренной и сильной засухи согласно данным большинства рассматриваемых метеостанций Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей.

По сути, использованный индекс ТГК может служить индикатором изменения климата, поскольку учитывает влияние как температуры, так и влажности воздуха. В настоящее время нами разрабатывается система мониторинга атмосферной засухи на основе ТГК в квазиреальном масштабе времени с шагом 30 минут. Данный мониторинг, надеемся, будет способствовать эффективному управлению весьма ограниченными водными ресурсами в орошаемом земледелии и увеличению урожайности сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата.

В перспективе планируется выйти на прогноз формирования атмосферной засухи на основе индекса ТГК, что позволит существенно улучшить качество

агрометеорологического обслуживания сельского хозяйства и принятию соответствующих мер борьбы с негативными её последствиями.

### Список литературы

1. Русин И. Н. Стихийные бедствия и возможности их прогноза. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2003. 140 с.
2. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. NY. USA. 2391 pp.
3. Бабушкин Л. Н., Кораи Н. А. Физико-географическое районирование Узбекской ССР // Труды Ташкентского государственного университета. 1964. Вып. 231. С. 5—247.
4. Бабушкин Л. Н. О климатической характеристике воздушной засухи и суховеев в хлопковой зоне Узбекистана // Суховеи, их прогнозирование и борьба с ними. Ташкент. 1974. С. 59—84.
5. Hobbins M., Wood A., Streubel D., Werner K. What drives the variability of evaporative demand across the conterminous United States? // Journal of Hydrometeorology. 2012. Vol. 13. P. 1195—1214.
6. McVicar T. R., Roderick M. L., Donohue R. J. et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 416—417. P. 182—205.
7. Zhang X., Duan Y., Duan J. et al. A daily drought index based on evapotranspiration and its application in regional drought analyses // Science China Earth Sciences. 2022. Vol. 65(2). P. 317—336.
8. Петров Ю. В., Абдуллаев А. К. К вопросу оценки сухости воздуха // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 90—96.
9. Петров Ю. В., Холматжанов Б. М., Эгамбердиев Х. Т. и др. Новый подход к классификации атмосферной засухи // Гидрометеорология и мониторинг окружающей среды. 2021. № 1. С. 20—36.
10. Mann H. B. Nonparametric tests against trend // Econometrica. 1945. Vol. 13. No. 3. P. 245—259. doi.org/10.2307/1907187.
11. Kendall M. G. Rank Correlation Methods. 4th edition. London: Charles Griffin, 1975.
12. Gilbert R. O. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. NY: Wiley, 1987.
13. Alimkulov S., Makhmudova L., Talipova E. et al. Assessment of the impacts of climate change on drought intensity and frequency using SPI and SPEI in the Southern Pre-Balkash region, Kazakhstan // Watershed Ecology and the Environment. 2025. Vol. 7. P. 11—22. doi.org/10.1016/j.wsee.2024.12.001.
14. Kong L., Li Y., Ma L. et al. Climate Change Impacts and Atmospheric Teleconnections on Runoff Dynamics in the Upper-Middle Amu Darya River of Central Asia // Water. 2025. Vol. 17(5). 721. https://doi.org/10.3390/w17050721.
15. Tangjialeke W., Zou J., Ding J. et al. Analysis of drought response thresholds and drought-causing factors of central Asian vegetation // Ecological Indicators. 2024. Vol. 169. 112926. doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112926.
16. Sun Y., Chen X., Yu Y. et al. Spatiotemporal Characteristics of Drought in Central Asia from 1981 to 2020 // Atmosphere. 2022. Vol. 13. 1496. doi.org/10.3390/atmos13091496.
17. Blain G. C. Removing the influence of the serial correlation on the Mann-Kendall test // Revista Brasileira de Meteorologia. 2014. Vol. 29(2). P. 161—170.
18. Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. In Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics. Berlin: Springer, 1992. P. 345—381.
19. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // Journal of the American Statistical Association. 1968. Vol. 63. P. 1379—1389.
20. Инагамова С. И., Мухтаров Т. М., Мухтаров Ш. Т. Особенности синоптических процессов Средней Азии. Ташкент: Изд-во САНИГМИ, 2002. 486 с.
21. Синоптические процессы Средней Азии / Под ред. Т. А. Сарымсакова, В. А. Бугаева, В. А. Джорджио и др. Ташкент: Изд-во АН Уз, 1957. 477 с.

22. Haag I., Jones P. D., Samimi C. Central Asia's Changing Climate: How Temperature and Precipitation Have Changed across Time, Space, and Altitude // *Climate*. 2019. Vol. 7(10). 123. doi.org/10.3390/cli7100123.

### References

1. Rusin I. N. *Stikhiyniye bedstviya i vozmozhnosti ikh prognoza = Natural disasters and their prediction capabilities*. Saint Petersburg: Publishing House of the RSHU, 2003: 140 p. (In Russ.).
2. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson–Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. NY. USA. 2391 pp.
3. Babushkin L. N., Kogay N. A. Physical-geographical zoning of the Uzbek SSR // *Trudy Tashkentского gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Tashkent State University*. 1964. 231:(5—247).
4. Babushkin L. N. On the climatic characteristics of air drought and dry winds in the cotton zone of Uzbekistan. V kn. *Sukhovei, ikh prognozirovaniye i bor'ba s nimi = In the book Dry winds, their forecasting and control*. Tashkent. 1974:(59—84). (In Russ.).
5. Hobbins M., Wood A., Streubel D., Werner K. What drives the variability of evaporative demand across the conterminous United States? *Journal of Hydrometeorology*. 2012; 13:1195—1214.
6. McVicar T. R., Roderick M. L., Donohue R. J. et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology*. 2012; 416—417:182—205.
7. Zhang X., Duan Y., Duan J. et al. A daily drought index based on evapotranspiration and its application in regional drought analyses. *Science China Earth Sciences*. 2022; 65(2):317—336.
8. Petov Yu. V., Abdullaev A. K. Towards the Problem of Air Dryness Estimation. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2010; (11):(90—96). (In Russ.).
9. Petov Yu. V., Kholmatjanov B. M., Egamberdiev Kh. T. et al. A new approach to the atmospheric drought classification. *Gidrometeorologiya i monitoring okruzhayushey sredy = Hydrometeorology and environmental monitoring*. 2021; (1):(20—36). (In Russ.).
10. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 1945; 13(3):245—259. doi.org/10.2307/1907187.
11. Kendall M. G. *Rank Correlation Methods*. 4th edition. London: Charles Griffin, 1975.
12. Gilbert R. O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, NY: Wiley, 1987.
13. Alimkulov S., Makhmudova L., Talipova E. et al. Assessment of the impacts of climate change on drought intensity and frequency using SPI and SPEI in the Southern Pre-Balkash region, Kazakhstan. *Watershed Ecology and the Environment*. 2025; 7:11—22. doi.org/10.1016/j.wsee.2024.12.001.
14. Kong L., Li Y., Ma L. et al. Climate Change Impacts and Atmospheric Teleconnections on Runoff Dynamics in the Upper-Middle Amu Darya River of Central Asia. *Water*. 2025; 17(5):721. https://doi.org/10.3390/w17050721.
15. Tangjialeke W., Zou J., Ding J. et al. Analysis of drought response thresholds and drought-causing factors of central Asian vegetation. *Ecological Indicators*. 2024. 169:112926. doi.org/10.1016/j.ecol-ind.2024.112926.
16. Sun Y., Chen X., Yu Y. et al. Spatiotemporal Characteristics of Drought in Central Asia from 1981 to 2020. *Atmosphere*. 2022; 13:1496. doi.org/10.3390/atmos13091496.
17. Blain G. C. Removing the influence of the serial correlation on the Mann-Kendall test. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2014; 29(2):161—170.
18. Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. In Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics. Springer: Berlin. Germany. 1992: 345—381.
19. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 1968. 63:1379—1389.
20. Inagamova S. I., Mukhtarov T. M., Mukhtarov Sh. T. *Osobennosti sinopticheskikh protsessov Sredney Azii = The peculiarities of synoptic processes of Central Asia*. Tashkent: Publishing House of the SANIGMI, 2002: 486 p. (In Russ.).

21. Sarymsakov T. A., Bugaev V. A., Djordjio V. A., et al. eds. *Sinopticheskiye protsessy Sredney Azii = Synoptic processes of Central Asia*. Tashkent: Publishing House of the AN Uz; 1957: 477 p. (In Russ.).
22. Haag I., Jones P. D., Samimi C. Central Asia's Changing Climate: How Temperature and Precipitation Have Changed across Time, Space, and Altitude. *Climate*. 2019; 7(10):123. doi.org/10.3390/cli7100123.

### **Информация об авторах**

*Махмудов Исроил Мухиддинович*, базовый докторант, Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, mahmudov\_i84@adu.uz.

*Бегматов Сардор Улугбек угли*, базовый докторант, Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, sardor0752@gmail.com.

*Сафаров Фируз Бахраметдинович*, аспирант, Российский государственный гидрометеорологический университет, заместитель директора по вопросам развития цифровых технологий, Агентство гидрометеорологической службы Республики Узбекистан, sfazizbek@gmail.com.

*Абанников Виктор Николаевич*, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, abvik@mail.ru.

*Бабушкин Олег Леонидович*, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной климатологии, Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Ташкент, boleg1944@mail.ru.

*Усманова Замира Султанкуловна*, научный сотрудник, Центрально-Азиатский Региональный гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан, zamira\_usmanova@mail.ru.

*Холматжанов Бахтияр Махаматжанович*, доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией моделирования климата, Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, профессор кафедры гидрологии суши и метеорологии, Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, b.holmatjanov@nuu.uz.

### **Information about authors**

*Makhmudov Isroil Mukhiddinovich*, PhD student, Hydrometeorological Research Institute.

*Begmatov Sardor Ulugbek ugli*, PhD student, Hydrometeorological Research Institute.

*Safarov Firuz Bakhrametdinovich*, postgraduate student, Russian State Hydrometeorological University, Deputy Director for Development of Digital Technologies, Agency of Hydrometeorological Service of the Republic of Uzbekistan.

*Abannikov Viktor Nikolaevich*, Candidate of Geographical Sciences, Docent of the Department of Meteorology, Climatology and Atmospheric Protection, Russian State Hydrometeorological University.

*Babushkin Oleg Leonidovich*, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Applied Climatology, Hydrometeorological Research Institute.

*Usmanova Zamira Sultankulovna*, researcher, Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO.

*Kholmatjanov Bakhtiyar Makhamatjanovich*, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Climate Modeling Laboratory, Hydrometeorological Research Institute, Professor of the Department of Land Hydrology and Meteorology, National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 14.03.2025*

*Принята к печати после доработки 23.06.2025*

*The article was received on 14.03.2025*

*The article was accepted after revision on 23.06.2025*