

Анализ долгосрочных тенденций осадков в Южном Приаралье

С. Б. Калабаев^{1,2}, Ф. Я. Артыкова², Б. Е. Аденбаев²

¹ Научно-исследовательский гидрометеорологический институт
Ташкент, 100052, Узбекистан
E-mail: salauat.kalabaev@gmail.com

² Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека
Ташкент, 100174, Узбекистан

Глобальное изменение климата и высыхание Аральского моря оказывают существенное влияние на динамику и пространственное распределение атмосферных осадков в Южном Приаралье, что приводит к дестабилизации экосистемы региона. В исследовании анализируются пространственно-временные тенденции и изменчивость годовых, сезонных и месячных осадков в регионе Южного Приаралья на основе материалов наблюдений метеостанций и спутниковых данных сеточного продукта. Данные о количестве ежемесячных осадков за 1981–2023 гг. получены из фондовых материалов Агентства гидрометеорологической службы Узбекистана (Узгидромет) и совместно с сеточными продуктами суточных осадков применены для установления временных изменений и пространственного распределения в регионе Южного Приаралья. Анализ результатов измерений атмосферных осадков на метеостанциях показал, что в регионе Южного Приаралья наблюдается ежегодная тенденция к уменьшению количества осадков с 1981 по 2023 г., в среднем на 7 мм в десятилетие. Сеточные данные об осадках были получены из наборов данных CHIRPS (*англ.* Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station) и PERSIANN-CDR (*англ.* Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks — Climate Data Record). Объединив аналитический потенциал обширных данных GEE (*англ.* Google Earth Engine), сравнены пространственные закономерности и временные тенденции в наблюдаемых и моделируемых осадках и выявлено, что продукты дистанционного зондирования можно надёжно использовать в недоступных районах, где метеостанции отсутствуют. Основные выводы данного исследования заключаются в том, что смоделированные с помощью CHIRPS осадки указывают на уменьшение годовых и сезонных осадков на 1,73 и 1,0 мм в период с 1981 по 2023 г., тогда как наземные наблюдения свидетельствуют об уменьшении на 8,8 и 2,5 мм.

Ключевые слова: осадки, регион Южного Приаралья, дистанционное зондирование, CHIRPS, PERSIANN-CDR, Google Earth Engine

Одобрена к печати: 02.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-317-332

Введение

Атмосферные осадки, являясь одним из основных звеньев в гидрологическом цикле, оказывают существенное влияние на состояние окружающей среды, тем самым играя важную роль в развитии различных отраслей экономики, особенно в сельскохозяйственном секторе — земледелии и животноводстве, в производстве гидроэлектроэнергии (государственные районные электростанции (ГРЭС), ГЭС и ТЭЦ), а также в сохранении биоразнообразия территории (Калабаев, Юлдошбаева, 2019).

Усыхание Аральского моря, которое сопровождается глобальным изменением климата, значительно повлияло на динамику и пространственное распределение атмосферных осадков в Южном Приаралье, вызвав их относительное уменьшение и перераспределение в течение года. Это отразилось на экосистеме региона и привело к определённым нарушениям. Результаты недавних исследований показали, что количественные характеристики изменения климата в Южном Приаралье превышают средние мировые значения (Калабаев, Султашова, 2019). С наблюдающимся ежегодным приростом населения в регионе, строительством новых поселений одновременно резко возрастает и миграция населения с побере-

жья Аральского моря в центральные районы республики Каракалпакстан. Поэтому изучение динамики атмосферных осадков в Южном Приаралье становится чрезвычайно важным для комплексного планирования отраслей экономики Каракалпакстана.

Региональное распределение осадков в районе Южного Приаралья различно; так, на севере региона в Муйнакском и Кунградском районах среднее многолетнее количество атмосферных осадков относительно выше (130–150 мм) и их основная часть приходится на зимние и весенние сезоны. На юге региона в Турткульском и Элликкалинском районах количество осадков несколько уменьшается (70–90 мм), а их интенсивность в весенний период увеличивается.

Для получения достоверной информации об изменениях пространственно-временного распределения атмосферных осадков в Южном Приаралье существенным препятствием является разброс метеостанций по региону. Поэтому для определения современной тенденции и прогноза будущих изменений в распределении и количестве атмосферных осадков использованы достижения в области облачных вычислений, позволяющие обрабатывать спутниковые данные об осадках с использованием веб-платформ дистанционного зондирования, таких как GEE (*англ.* Google Earth Engine). Следует отметить, что с недавнего времени доступ к сеточным спутниковым данным стал более открытым (Banerjee et al., 2020; López-Carr et al., 2014; Sharifi et al., 2016; Sidhu et al., 2018). Поэтому многочисленные спутниковые наблюдения и данные реанализа за осадками с более высоким пространственным и временным разрешением, такие как TRMM (*англ.* Tropical Rainfall Measuring Mission), GPCC (*англ.* Global Precipitation Climatology Centre), APHRODITE (*англ.* Asian Precipitation — Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation), ERA-Interim (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Interim Reanalysis), CFSR (*англ.* Climate Forecast System Reanalysis), GPM (*англ.* Global Precipitation Measurement), CHIRPS (*англ.* Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station) и PERSIANN-CDR (*англ.* Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks — Climate Data Record), стали доступными.

В исследовании использован набор данных CHIRPS и PERSIANN-CDR, учитывая их более высокое пространственно-временное разрешение, доступность последних данных, пригодность для равнинной местности, такой как Южное Приаралье. Эти данные являются важными ресурсами для анализа метеорологических и климатических изменений.

Учитывая важность оценки количества, сезонности, изменчивости и долгосрочных тенденций в характеристиках осадков в регионе, цель данного исследования заключается в оценке пространственно-временной динамики атмосферных осадков в Южном Приаралье за период с 1981 по 2023 г. и выявлении закономерностей изменения количества осадков и возможного воздействия на окружающую среду. Для достижения цели намечено выполнение следующих задач:

а) сбор и анализ данных осадков, собранных из 1) имеющихся наземных наблюдений, находящихся под управлением гидрометеорологической службы Республики Узбекистан (Узгидромет); 2) данных реанализа осадков от CHIRPS и 3) спутниковых данных об осадках PERSIANN-CDR;

б) разработка карты годовых и динамики сезонных временных рядов осадков, сопоставление результатов реанализа и спутниковых данных с данными наземных станций;

в) оценка годового, сезонного и ежемесячного распределения осадков и их тенденций;

д) обсудить региональные социально-экономические последствия наблюдаемой изменчивости осадков.

Экологическая характеристика Южного Приаралья

Южное Приаралье — часть территории республики Каракалпакстан на северо-западе Узбекистана (*рис. 1*, см. с. 319). При научном анализе природно-географических особенностей Южного Приаралья особое внимание уделяется его сложной экологической системе, кли-

матическим и гидрологическим условиям, строению земной поверхности, биологическому разнообразию, состоянию природных ресурсов. В регионе преобладают засушливые и полужасушливые климатические условия, годовое количество осадков составляет менее 100 мм, а резкие перепады температуры зимой и летом напрямую влияют на эколого-гидрологические характеристики региона. Летняя температура воздуха поднимается до 44 °С, а в зимние месяцы опускается до –20 °С, эти изменения оказывают существенное влияние на биологические и гидрологические процессы земной поверхности.

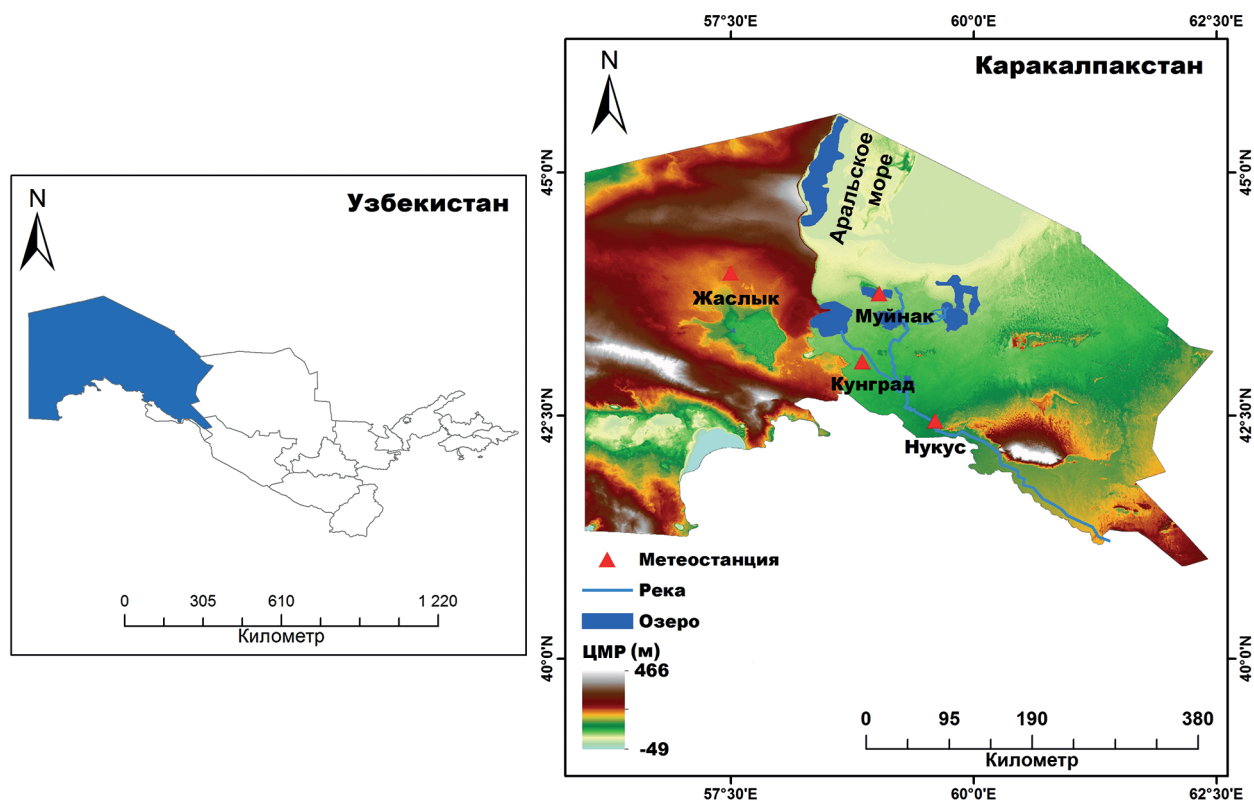


Рис. 1. Расположение Южного Приаралья (ЦМР — цифровая модель рельефа)

Структура поверхности территории состоит в основном из равнин и низкогорных зон с множеством песчаных дюн и солончаков. Из-за сокращения вод Аральского моря расширились старое побережье и пустынные территории региона, усилились процессы засоления поверхности земли. Эти процессы влияют на сельскохозяйственное использование земель и природных ресурсов, так как образуются засоленные почвы и песчаные поверхности, тормозящие развитие флоры и фауны.

В гидрологическом отношении основные водные источники в Южном Приаралье сокращаются, что оказывает негативное влияние на экологическую стабильность региона. В результате высыхания Аральского моря и истощения вод Амударьи водоснабжение претерпело существенные изменения. Высыхание Аральского моря и усиление засоления его вод привели к угрозе экосистеме и биоразнообразию. Усугубляя экологические проблемы, эти процессы привели к эрозии почвы и сокращению ресурсов для сельского хозяйства и населения в регионе.

С точки зрения биоразнообразия в регионе ограничено количество видов растений и животных, но некоторые перелётные птицы и пустынные растения всё ещё существуют. Хотя природные ресурсы региона, особенно полезные ископаемые и разработка залежей соли, повысили социально-экономическую значимость территории, однако изменение климата и гидрологические проблемы стали препятствием его развитию.

Материалы и методы

Наблюдаемые данные

Данные о наблюдаемых ежемесячных осадках с 1981 по 2023 г. были получены от Агентства Узгидромета (*табл. 1*). Надёжные и достаточно непрерывные ежемесячные данные для этих наземных станций были доступны за период с 1981 по 2023 г.

Таблица 1. Данные наблюдений на метеорологических станциях (собранные в Узгидромете)

Метеостанция	Местоположение		Период	Высота, м
	° с. ш.	° в. д.		
Нукус	42,45	59,62	1874 г. — наст. время	77
Муйнак	43,75	58,73	1928 г. — наст. время	55
Кунград	43,08	58,93	1934 г. — наст. время	64
Жаслык	43,88	57,52	1951 г. — наст. время	128

Данные об осадках в сетке

Наряду с наблюдаемыми данными, один реанализ (CHIRPS) и один спутниковый (PERSIANN-CDR) сетчатый продукт осадков были получены с использованием GEE (*табл. 2*). Примечательно, что сетчатый продукт ежедневных осадков CHIRPS представляет собой комбинацию наблюдаемых и спутниковых данных об осадках и имеет низкое систематическое смещение (Beck et al., 2017; Prakash, 2019; Ullah et al., 2018) с длительным периодом записи. Данные CHIRPS доступны на веб-сайте Climate Hazard Group. Данные PERSIANN-CDR представляют собой спутниковую оценку ежедневных осадков с использованием искусственных нейронных сетей с высоким пространственно-временным разрешением и точностью (Guo et al., 2015; Yang et al., 2016) и извлекаются из веб-сайта NCAR (*англ.* National Center for Atmospheric Research, Национальный центр атмосферных исследований). Искусственная нейронная сеть оценивает осадки по пикселям холодных облаков и смежным объектам, используя детали яркости температуры спутниковой сетки.

Таблица 2. Данные, используемые для оценки долгосрочной изменчивости осадков

Продукт данных	Годы	Источник	Разрешение, м
CHIRPS	1981–2023	UCSB/CHG	5 566
PERSIANN-CDR	1983–2023	NOAA/NCDC	27 830

Для оценки долгосрочных тенденций на основе имеющихся записей наблюдений Узгидромета были собраны данные о месячных осадках с 1981 по 2023 г. Последние пространственные и временные тенденции были реализованы путём сравнения их с имеющимися координатными (*англ.* reanalysis data) данными за период с 1981 по 2023 г.

Обработка данных и статистические приложения в GEE

Годовые, сезонные и месячные данные о количестве атмосферных осадков были получены с помощью платформы GEE (Banerjee et al., 2020; Gorelick et al., 2017; Vos et al., 2019; Wang et al., 2017) с использованием алгоритма ee.ImageCollection и применения команды фильтра (ee.Filter.calendarRange) для охвата периода исследования (1981–2023). После обработки

изображений (.sum) функция обрезки (.clip) была использована для ограничения границ в регионе исследования Южного Приаралья. Эти смоделированные наборы данных высокого разрешения были загружены и проанализированы в редакторе кода GEE. В результате первичного анализа установлено, что существует значительная разница между значениями атмосферных осадков, полученными из базы данных PERSIANN-CDR (187 мм) и с наземных станций наблюдения (94 мм). Поэтому на следующем этапе исследований статистический анализ и расчёты продолжились на основе данных CHIRPS и данных наземных наблюдений.

Затем в GEE был выполнен анализ долгосрочного пространственно-временного тренда на основе пикселей для набора данных с сеткой с использованием алгоритма *ee.Reducer.senSlope*. Наклон Сена (величина тренда) был проверен с помощью выражения Манна–Кендалла (при уровне значимости $\alpha = 0,05$, статистика $Z = 1,96$ получена из стандартной нормальной таблицы). Затем сеточные ежедневные записи осадков были объединены в ежемесячные и сезонные итоги, а именно: весна, лето, осень, зима (Zečňáková et al., 2017).

В регионе Южного Приаралья, особенно на высохшем морском дне и на плато Устюрт, метеонаблюдения не проводятся, поэтому для проверки распределения данных и относительной продуктивности наборов с сеткой данных были применены некоторые описательные статистические показатели. Это позволило использовать в дальнейших исследованиях высококачественные спутниковые данные об осадках.

Применены следующие статистические показатели: средняя дисперсия между наблюдаемыми и спутниковыми/модельными значениями осадков Bias (*англ.* смещение); мультипликативные смещения MBias (*англ.* multiplicative) для измерения средней величины смещения; относительное смещение RBias (*англ.* relative) для выявления систематического стандартного отклонения; среднее рассогласование MAE (*англ.* mean absolute error) для получения среднего наклона; среднеквадратическое отклонение (σ) для оценки средней величины отклонения; коэффициент корреляции (r) для оценки степени связи между наблюдаемыми и спутниковыми данными (Beck et al., 2017; Maan, 1945; Sen, 1968).

Смещение Bias обозначает среднюю дисперсию между данными *in situ* и данными со спутника. Положительное смещение указывает на недооценку, а отрицательное — на переоценку количества осадков.

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{s_i} - X_{o_i}),$$

где X_{s_i} и X_{o_i} — спутниковые и наблюдаемые значения осадков соответственно; n — число наблюдений.

Мультипликативное смещение MBias — это средняя величина осадков в сетке по наблюдаемым расчётам, где недооценка, по-видимому, составляет менее единицы, а переоценка — больше единицы. Фактически это оценка функции массы вероятности для отдельных ядер набора наблюдений, включая дисперсию и среднюю интегрированную стандартную ошибку.

$$\text{MBias} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{s_i}}{\sum_{i=1}^n X_{o_i}}.$$

Относительное смещение (RBias) иллюстрирует систематическую погрешность спутниковых данных осадков и служит аналогом обычного смещения (Bias). Оно фактически оценивает стандартную ошибку между наблюдаемыми и спутниковыми данными.

$$\text{RBias} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{s_i} - X_{o_i})}{\sum_{i=1}^n X_{o_i}}.$$

Среднее рассогласование MAE используется для демонстрации средней величины погрешности в спутниковых и наблюдаемых значениях осадков; MAE — показатель, представляющий среднюю абсолютную разницу между данными спутников и наблюдаемыми значениями. Этот показатель используется для оценки точности данных, измеренных спутником, и отображает её погрешность в абсолютных единицах. Рассчитывается по следующему выражению:

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_{s_i} - X_{o_i}|}{n}.$$

Среднеквадратическое отклонение σ аналогично средней абсолютной ошибке. Однако она отдаёт приоритет расчёту средней величины ошибки в спутниковых и натурных измерениях.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{s_i} - X_{o_i})^2}.$$

Коэффициент корреляции широко используется для описания пространственного согласия между наблюдаемыми и сеточными наборами данных. Идеальное отношение указывает на +1.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{s_i} - X_{s_{cp}}) \cdot (X_{o_i} - X_{o_{cp}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{s_i} - X_{s_{cp}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{o_i} - X_{o_{cp}})^2}}.$$

Кроме того, оценка наклона Сена использовалась для расчёта долгосрочной величины изменения в наблюдаемых данных станции, тест Манна — Кендалла был применён с использованием языка программирования MatLab для оценки их статистической значимости (Drápela, Drápelová, 2011; Hamed, Rao, 1998).

Результаты

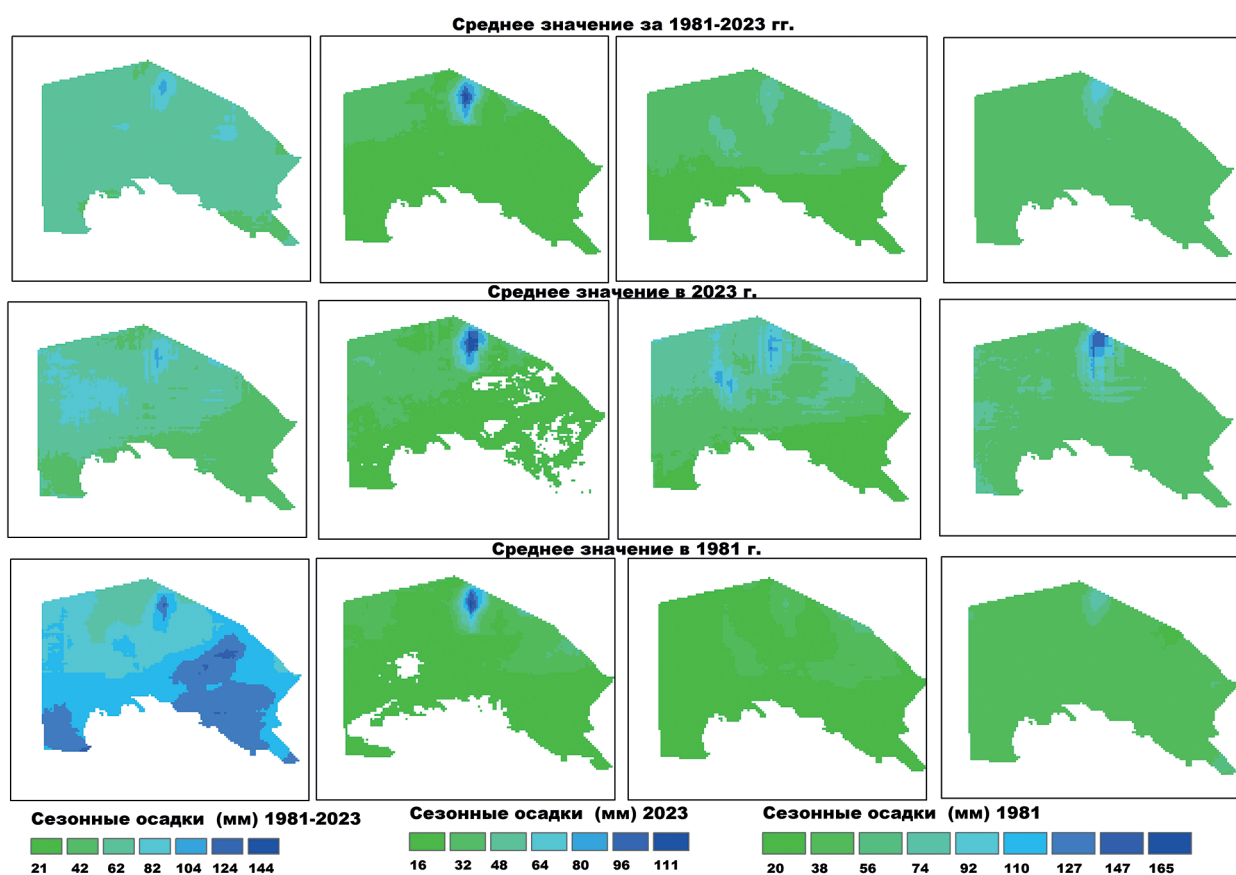
Пространственно-временное распределение осадков в Южном Приаралье (1981–2023)

Среднее годовое количество осадков за многолетие (1981–2023) в Нукусе, Кунграде, Муйнаке, Жаслыке соответственно равно 100, 107, 126, 134 мм. Количество осадков больше всего на севере и северо-западе (140–160 мм) и несколько меньше (90 мм) на юго-востоке Южного Приаралья (рис. 2, см. с. 323).

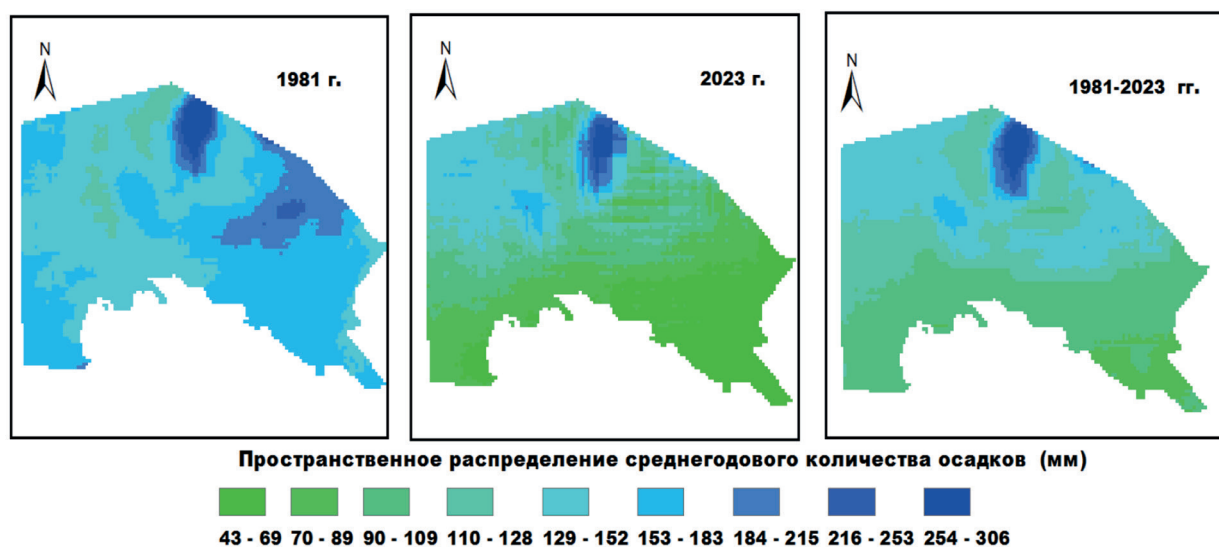
Изучено внутригодовое распределение атмосферных осадков за 1981, 2023 гг. и в среднем за период 1981–2023 гг. По результатам исследований, в 1981 г. количество осадков на большей части региона изменялось в интервале 153–182 мм, а в 2023 г. этот показатель зафиксирован в пределах 69–89 мм. Таким образом, за 43 года количество атмосферных осадков в регионе сократилось почти в два раза.

Анализируя годовое распределение атмосферных осадков за весь период, установлено, что количество атмосферных осадков в северной части региона, в частности на высохшей акватории Аральского моря и на севере плато Устюрта, в среднем на 30 мм больше, чем в южной части региона.

Максимальное количество осадков зафиксировано в весенний сезон — 42 % от годового, зимой — 29 %, осенью — 22 % и летом — 7 %. Данные наблюдений на станции показали, что среднее годовое количество осадков в регионе Южного Приаралья составляет 122 мм, а по CHIRPS — 114 мм. Весна является сезоном с наибольшим количеством осадков, за ней следуют зима и осень (табл. 3).



а



б

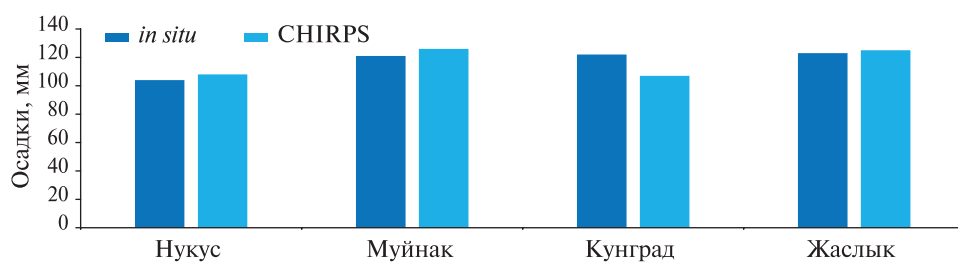
Рис. 2. Пространственное распределение сезонного (а) и годового (б) количества осадков

Сетчатый набор данных CHIRPS показывает схожую пространственную изменчивость на всех станциях, но лучшее соответствие наблюдается в сезонных и месячных масштабах. Среднее годовое количество осадков, наблюдаемых на станциях, составило 109–127 мм, а CHIRPS занижает количество осадков до 102–125 мм. Сетчатый набор данных CHIRPS лучше согласуется с данными об осадках на всех метеостанциях за весну, осень и зиму, а за летние месяцы осадки занижаются (рис. 3, см. с. 324).

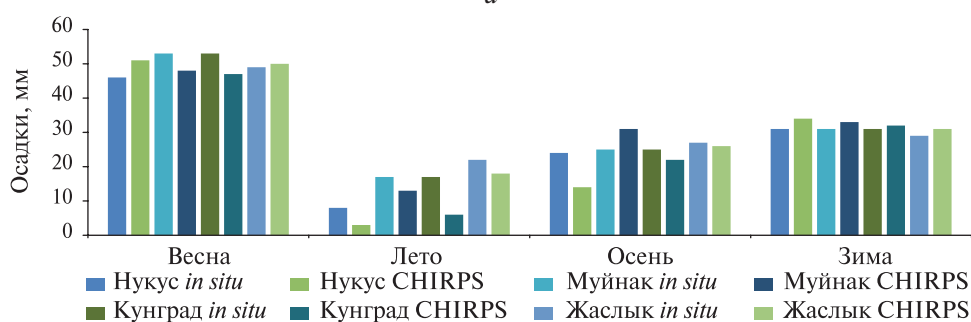
Таблица 3. Среднее годовое, сезонное и месячное распределение станционных и сеточных данных CHIRPS в регионе Южного Приаралья за период с 1981 по 2023 г.

Сезон	Нукус		Муйнак		Кунград		Жаслык	
	<i>in situ</i>	CHIRPS	<i>in situ</i>	CHIRPS	<i>in situ</i>	CHIRPS	<i>in situ</i>	CHIRPS
Весна	46	51	53	48	53	47	49	50
Лето	8	3	17	13	17	6	22	18
Осень	24	14	25	31	25	22	27	26
Зима	31	34	31	33	31	32	29	31
Год	109	102	126	125	126	107	127	125

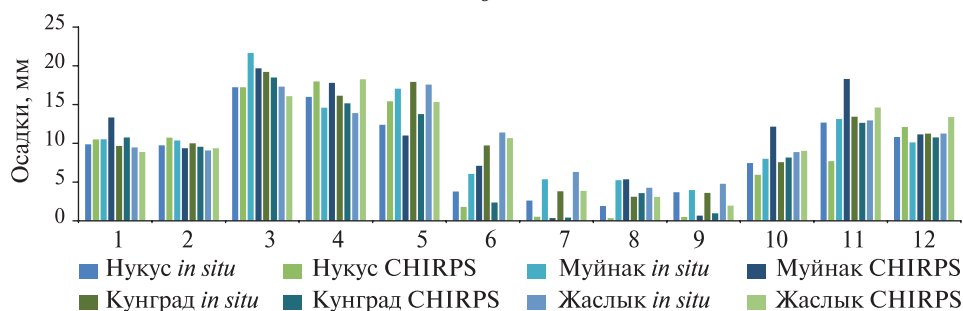
Месяц		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Нукус	<i>in situ</i>	10	10	17	16	12	4	3	2	4	7	13	9
	CHIRPS	11	11	17	18	15	2	1	0	0	6	8	8
Муйнак	<i>in situ</i>	11	10	22	15	17	6	5	5	4	8	13	11
	CHIRPS	13	9	20	18	11	7	0	5	1	12	18	11
Кунград	<i>in situ</i>	10	10	19	16	18	10	4	3	4	8	13	10
	CHIRPS	11	10	18	15	14	2	0	4	1	8	13	9
Жаслык	<i>in situ</i>	9	9	17	14	18	11	6	4	5	9	13	11
	CHIRPS	9	9	16	18	15	11	4	3	2	9	15	10



а



б



в

Рис. 3. Среднее распределение осадков по метеостанциям и в сетке. Годовые (а), сезонные (б) и месячные (в) осадки соответственно за период с 1981 по 2023 г.

Подробные результаты описательной статистики

По результатам статистического анализа минимальное значение среднего рассогласования (MAE) составило 18 мм (Нукус), а максимальное — 37,96 мм (Муйнак). Данные CHIRPS завысили количество осадков в Нукусском, Муйнакском и Жаслыкском районах (Bias — смещение положительное) и занизили его в Кунграде (Bias — смещение отрицательное). MBias представляет собой среднюю разницу между CHIRPS и данными наблюдений, её наименьшее значение зафиксировано для Нукуса, а наибольшее — в Муйнаке. Значение MBias в Кунграде отрицательное и равно $-0,94$ (табл. 4).

Таблица 4. Статистические индексы для проверки пространственного сходства между наблюдаемым и сеточным набором данных (CHIRPS) за период с 1981 по 2023 г.

Статистические индексы с единицами измерения	CHIRPS			
	Нукус	Муйнак	Жаслык	Кунград
Среднеквадратическое отклонение σ , мм	22,40	45,10	41,20	33,10
Среднее рассогласование MAE, мм	18,00	37,96	32,77	26,42
Смещение Bias, мм	4,00	11,00	23,00	-7,00
Мультипликативное смещение MBias, мм	1,04	1,09	1,19	-0,94
Относительное смещение RBias, %	3,93	9,09	18,85	5,74
Коэффициент корреляции r	0,76	0,55	0,72	0,79

Высокие значения коэффициента корреляции между CHIRPS и данными наблюдений зафиксированы на всех станциях, кроме Муйнака. Среднее смещение данных CHIRPS составляет 11 мм, а коэффициент корреляции с данными наблюдений равен 0,70. Метеостанции в дельте Амударьи продемонстрировали схожую пространственную связь с сеточными наборами данных. Статистический анализ показал хорошую согласованность между данными CHIRPS и наземными наблюдениями. Было замечено, что значение смещения составляет 4 мм в Нукусе и 7 мм в Кунграде, что близко к приемлемому значению для этих метеостанций. Однако в Жаслыке и Муйнаке Bias оказалось несколько выше принятого значения в 10 мм.

Пространственно-временные тенденции: данные наблюдений

Годовые и сезонные тенденции в данных метеостанций по осадкам (1981–2023)

На следующем этапе исследования были изучены годовое, сезонное распределение и тенденция осадков с 1981 по 2023 г. Максимальное годовое количество осадков зафиксировано на расположенной немного выше метеорологической станции Жаслык, далее следуют станции Кунград, Муйнак и Нукус. Анализ данных показывает, что на трёх метеостанциях наблюдается тенденция к снижению количества осадков. В период с 1981 по 2023 г. уменьшение количества атмосферных осадков: в Нукусе $-5,9$ мм/десятилетие, в Кунграде $-8,9$ мм/десятилетие, а максимально низкое значение было равно $-23,0$ мм/десятилетие в Муйнаке (табл. 5). Зимой на всех станциях наблюдалась тенденция к снижению количества осадков, кроме метеорологической станции Жаслык. На станции Кунград существенное уменьшение осадков происходило во все сезоны года; так, зимой на $-1,0$ мм/десятилетие, осенью на $-1,5$ мм/десятилетие, весной на $-3,6$ мм/десятилетие и летом на $-1,4$ мм/десятилетие. Максимальное понижение количества осадков в Муйнаке было зафиксировано зимой и составило -7 мм/десятилетие, также были получены значения: для осени $-3,9$ мм/десятилетие, лета $-3,8$ мм/десятилетие и весны $-3,2$ мм/десятилетие. Значительное уменьшение

количества осадков наблюдалось в Муйнаке зимой: $-7,0$ мм/десятилетие, что было статистически значимым. В Нукусе отрицательная тенденция фиксировалась: весной $-0,5$ мм/десятилетие и летом $-0,6$ мм/десятилетие, а также осенью $-0,7$ мм/десятилетие, но она была статистически незначимой.

Таблица 5. Годовое и сезонное распределение осадков и тенденция (1983–2023) в регионе Южного Приаралья по данным наземных станций

Метеостанция		Наклон Сена (в мм/десятилетие)				
		Год	Весна	Лето	Осень	Зима
Нукус	Распределение	104	45	7	22	30
	Тенденция	$-5,9$	$-0,5$	$-0,6$	$-0,7$	$-2,9$
Муйнак	Распределение	121	52	15	24	30
	Тенденция	$-23,0$	$-3,2$	$-3,8$	$-3,9$	$-7,0$
Кунград	Распределение	123	52	15	24	30
	Тенденция	$-8,9$	$-3,6$	$-1,4$	$-1,5$	$-1,0$
Жаслык	Распределение	122	48	20	25	31
	Тенденция	2,3	1,7	$-0,5$	$-0,2$	1,0

Примечание: Выделенные полужирным начертанием числа статистически значимы ($\alpha = 0,05$).

Ежемесячные тенденции в данных метеостанций (1981–2023)

Для дальнейшего изучения изменений количества осадков в регионе за исследуемый период были проанализированы ежемесячное распределение и тенденция выпадения осадков. Наибольшее количество осадков на всех метеостанциях наблюдалось в марте, апреле и мае. Статистический анализ тенденций показывает заметное снижение осадков в Муйнаке в январе на $-1,7$ мм/десятилетие, в марте на $-2,0$ мм/десятилетие и декабре на $-2,5$ мм/десятилетие (табл. 6). Месячные значения для Кунграда не показывают статистически значимых тенденций, хотя количество осадков в январе и марте за исследуемый период уменьшилось.

Таблица 6. Месячное распределение и тенденции осадков в Южном Приаралье (в мм/десятилетие, 1981–2023 гг.) по данным станционных наблюдений

Месяц		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Нукус	Распределение	10	10	17	16	12	4	3	2	4	7	13	9
	Тенденция	$-1,5$	$-0,1$	$-0,6$	0,8	$-1,0$	$-0,3$	0	0	0	0,1	$-1,0$	$-0,3$
Муйнак	Распределение	11	10	22	15	17	6	5	5	4	8	13	11
	Тенденция	$-1,7$	$-1,1$	$-2,0$	$-1,8$	$-0,6$	$-1,5$	$-0,1$	$-0,2$	$-0,3$	$-1,1$	$-1,6$	$-2,5$
Кунград	Распределение	10	10	19	16	18	10	4	3	4	8	13	10
	Тенденция	$-0,7$	1,0	$-3,0$	$-0,2$	$-1,4$	$-0,6$	$-0,4$	0	0	0	$-0,4$	$-0,3$
Жаслык	Распределение	9	9	17	14	18	11	6	4	5	9	13	11
	Тенденция	1,2	0,2	1,0	0,1	$-1,5$	$-1,7$	1,0	0	0	0,02	$-0,1$	$-0,8$

Примечание: Выделенные полужирным начертанием числа статистически значимы ($\alpha = 0,05$).

Пространственно-временные тенденции: CHIRPS

Годовые и сезонные тенденции (1981–2023)

Статистически значимые тенденции к снижению годового количества осадков также отмечены в сетке данных, составляя в среднем $-0,05$ мм/десятилетие (табл. 7). По данным CHIRPS, за исследуемый период наблюдалось уменьшение количества осадков во все сезоны, за исключением северных регионов. Данные CHIRPS демонстрируют хорошую согласованность за исследуемый период, что подтверждается более высоким коэффициентом корреляции ($r = 0,74$). В пространственном отношении статистически значимая тенденция уменьшения количества осадков приурочена к юго-западной, юго-восточной и центральной части исследуемой территории (рис. 4). Тенденция к уменьшению количества осадков в юго-западной части района статистически незначима. В северной части региона (Приаралье, к востоку от Устьюрта) наблюдается увеличение количества атмосферных осадков, что статистически значимо.

Таблица 7. Годовые и сезонные тенденции количества осадков в Южном Приаралье (мм/десятилетие, 1981–2023 гг.)

CHIRPS	Год	Весна	Лето	Осень	Зима
Нукус	−0,9	−0,2	3,80	2,0	2,2
Муйнак	−0,5	−1,7	0,07	−0,1	−0,7
Кунград	−3,8	−2,0	−1,80	−1,4	−1,4
Жаслык	5,0	5,6	5,00	4,6	5,6

Примечание: Выделенные полужирным начертанием числа статистически значимы ($\alpha = 0,05$).

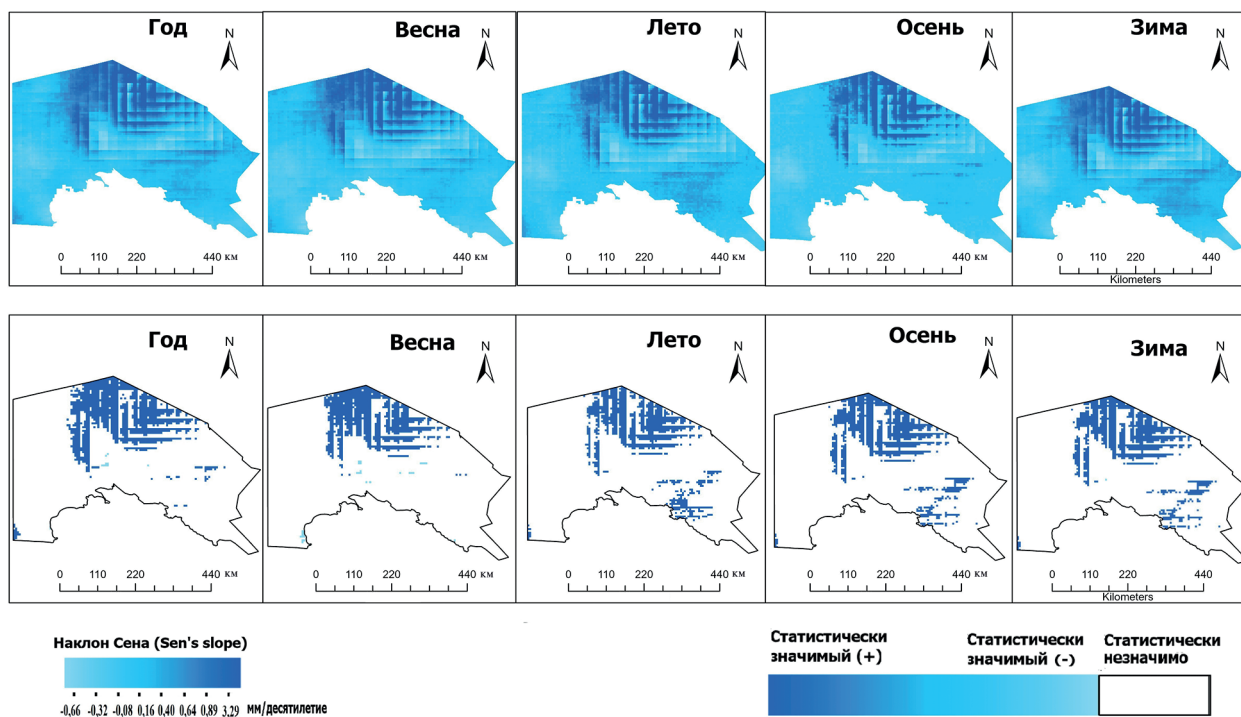


Рис. 4. Пространственное распределение тенденции годовых и сезонных осадков и их статистическая значимость (1983–2023)

Данные CHIRPS хорошо коррелируют с данными метеостанции Жаслык ($r = 0,72$) и показывают увеличение количества осадков во всех сезонах в северной части региона (зна-

чительную тенденцию). Согласно данным CHIRPS, в районе станции Кунград наблюдается значительное снижение осадков и это изменение является статистически значимым. Однако в южной части Аральского моря и в западных районах плато Устюрт также зафиксировано уменьшение осадков, но это изменение не является статистически значимым.

Ежемесячные тенденции: CHIRPS (1981–2023)

Согласно данным CHIRPS, в январе, марте, мае, августе и декабре наблюдается значительное снижение количества осадков (табл. 8). В то же время в феврале и апреле зафиксирована статистически значимая тенденция к небольшому увеличению осадков.

Таблица 8. Ежемесячный тренд осадков по сеточным наборам данных (в мм/десятилетие, 1981–2023 гг.)

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Нукус	–0,4	0,3	–0,2	1,7	–0,7	0	0	0,0	0	0,6	0	–0,4
Муйнак	0,2	0,2	–0,9	1,6	–0,6	–0,6		–1,3		–0,4	0,1	–0,3
Кунград	–0,4	0,2	–1,0	1,9	–0,4	0		–0,8		0,1	0,1	–1,3
Жаслык	0,3	0,3	–0,8	1,3	0,5	–0,4		0,0		0,2	0,6	0,4

Примечание: Выделенные полужирным начертанием числа статистически значимы ($\alpha = 0,05$).

Межгодовая изменчивость и тенденции количества осадков (1981–2023) по данным наблюдений на станциях и CHIRPS

В Южном Приаралье межгодовая изменчивость осадков в период 1981–2023 гг. была проанализирована на основе данных сеток и данных метеорологических станций Кунград и Жаслык, которые имеют наибольшую корреляцию с этими данными ($r = 0,79$). Результаты исследований показали, что, согласно данным станционных наблюдений, количество осадков в период 1981–2023 гг. в среднем уменьшалось на $-8,9$ мм/десятилетие (по данным CHIRPS — на $-0,05$ мм/десятилетие). В северной части региона на станции Жаслык, напротив, наблюдается тенденция увеличения осадков на $2,3$ мм/десятилетие (по данным CHIRPS — на 5 мм/десятилетие). Результаты исследования также показывают, что на станции Жаслык за последние 20 лет (2003–2023) месячные и сезонные осадки увеличились по сравнению с предыдущими десятилетиями. В то же время на станции Кунград зафиксировано значительное снижение количества осадков, которое составляет $-8,8$ мм/десятилетие (рис. 5).

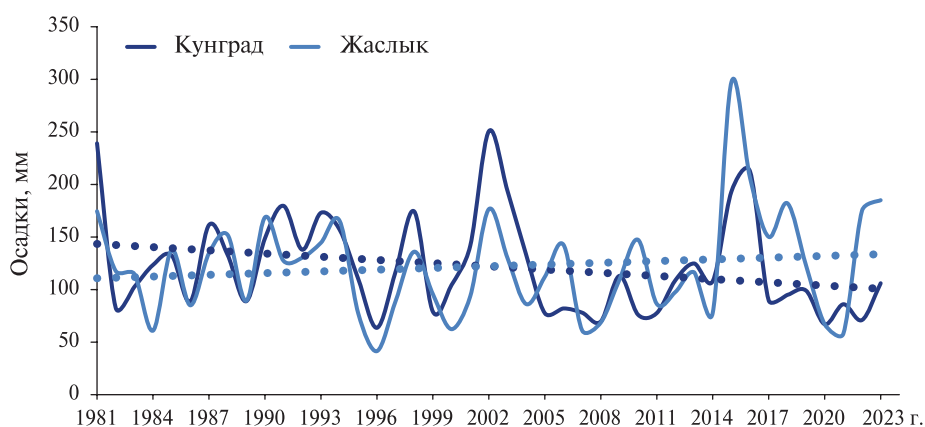


Рис. 5. Межгодовая изменчивость осадков

Обсуждение

В этом исследовании анализируются годовые, сезонные и месячные тенденции и изменчивость осадков за последние 40 лет с использованием наземных наблюдений и набора сеточных данных высокого разрешения (CHIRPS). Эти два набора данных были откалиброваны и сравнены с использованием нескольких непараметрических статистических методов, которые выявляют уровни значимости ($\alpha \leq 0,05$) для широкого диапазона характеристик данных.

В исследовании показано, что в течение года наибольшее количество осадков наблюдалось весной (42 %), затем следовали зима (24 %), осень (20 %) и лето (13 %).

Временные тенденции в наблюдаемых осадках (1981–2023)

Значительные колебания годовых, сезонных и месячных осадков были обнаружены с помощью наблюдений, полученных на метеостанциях. На исследуемой территории отчётливо прослеживается пространственная изменчивость тенденций осадков и влияние таких факторов, как рельеф и географическое положение на распределение осадков. В Муйнаке наблюдалось значительное снижение годовых и зимних осадков ($-23,0$ и $-7,0$ мм/десятилетие), за ним следуют Кунград и Нукус. В таких условиях особенности рельефа являются основным фактором, влияющим на распределение осадков, например, Жаслык расположен относительно западнее и получает больше осадков зимой, чем Кунград и Нукус. В период с 1981 по 2023 г. в районе Кунграда и Муйнака на Южном Приаралье наблюдалось уменьшение количества атмосферных осадков ($-0,2$ – 7 мм/десятилетие) во все сезоны года из-за резкого снижения уровня воды в Аральском море. Лишь на плато Устюрт (Жаслык) количество осадков увеличилось весной и зимой ($1,0$ – $1,7$ мм/десятилетие).

Соответствие наборов данных с сеткой с наземными наблюдениями (1981–2023)

Климат Южного Приаралья континентальный, после высыхания Аральского моря на новой пустынной местности под названием Аралкум метеорологические станции отсутствуют. Поэтому продукты дистанционного зондирования и реанализа служат основным источником для определения количества осадков в этом регионе. Облачные вычисления GEE и продукты CHIRPS для определения количества осадков можно сравнивать и статистически анализировать с точки зрения эффективности с данными наземных наблюдений. Данные об осадках CHIRPS были изучены с использованием нескольких статистических методов и установлено, что долгосрочные годовые и сезонные тенденции осадков соответствуют наземным наблюдениям.

Статистический анализ показывает, что CHIRPS имеет более низкие систематические смещения и ошибки пространственного распределения. Годовые, сезонные и месячные тренды с 1981 по 2023 г. хорошо отражают данные наземной станции.

Влияние изменений количества осадков на региональную окружающую среду

Очевидно, что изменения в количестве осадков будут иметь значительные экологические и социально-экономические последствия, особенно на равнинах Южного Приаралья.

За последние несколько десятилетий (1979–2023) население Каракалпакстана увеличилось в 2,1 раза — с 0,9 до 1,9 млн человек, при темпах прироста в 11 %, что выше среднего мирового показателя. Приведённые здесь временные закономерности выпадения осадков указывают на то, что население уже столкнулось с большими трудностями в этом отношении, а в будущем будет сталкиваться всё чаще. Почти 60 % населения региона занято в сельском хозяйстве, мелким производством и поэтому полностью зависит от водоснабжения из реки

Амударьи. Ранние весенние осадки имеют решающее значение для успешного развития пастбищного животноводства.

Выводы

Основной целью данного исследования была оценка пространственно-временной динамики осадков для региона Южного Приаралья в период с 1981 по 2023 г. с использованием как данных об осадках *in situ*, так и данных с сеткой. Непараметрические статистические индексы применялись в сочетании с передовой веб-платформой облачных вычислений (GEE). В настоящем исследовании адекватно используются приложения больших данных с применением платформы GEE, а также языка программирования MatLab (Python) для описания монотонного тренда данных с сеткой и наблюдаемых данных. Основные выводы исследования можно резюмировать следующим образом.

Настоящее исследование даёт всестороннее понимание долгосрочной тенденции наблюдаемых осадков вместе с наборами данных реанализа. Статистические индексы показали, что данные CHIRPS имеют хорошую продуктивность и точность по сравнению с данными наблюдений. Продукты с сеткой данных зафиксировали статистически значимые тенденции уменьшения (Кунград) и увеличения (Жаслык) количества осадков с 1981 по 2023 г. Набор CHIRPS показал аналогичную тенденцию, соответствующую данным станции, в среднем $-0,2$ мм осадков за десятилетие (максимум $-3,8$ мм/десятилетие) за изучаемый период.

Понимание пространственных и временных закономерностей, тенденций осадков в регионе Южного Приаралья остаётся сложной задачей вследствие условий резкого континентального климата, низкого пространственного мониторинга из-за отсутствия станций на обсохшем дне моря. Продукты данных реанализа высокого разрешения (CHIRPS) можно анализировать с помощью более мощных современных приложений облачных вычислений, таких как GEE, и предоставлять ценную информацию о динамике осадков в регионе.

Литература

1. Калабаев С. Б., Султашова О. Г. Изменения температуры воздуха Южного Приаралья // Вестн. Каракалпакского гос. ун-та им. Бердаха. 2019. № 2(43). С. 17–19.
2. Калабаев С. Б., Юлдошбаева М. Р. Куйи Амударё сув объектларининг гидрографик тавсифи // Изв. геогр. об-ва Узбекистана. 2019. Т. 56. С. 235–239.
3. Banerjee A., Chen R., Meadows M. et al. An analysis of long-term rainfall trends and variability in the Uttarakhand Himalaya using Google Earth Engine // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 4. Article 709. <https://doi.org/10.3390/rs12040709>.
4. Beck H. E., Vergopolan N., Pan M. et al. Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modelling // Hydrology and Earth System Sciences. 2017. V. 21. No. 12. P. 6201–6217. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-6201-2017>.
5. Drápela K., Drápelová I. Application of Mann-Kendall test and the Sen's slope estimates for trend detection in deposition data from Bílý Kříž (Beskydy Mts, the Czech Republic) 1997–2010 // Beskydy. 2011. V. 4. P. 133–146.
6. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
7. Guo H., Chen S., Bao A. et al. Inter-comparison of high-resolution satellite precipitation products over Central Asia // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 6. P. 7181–7211. <https://doi.org/10.3390/rs70607181>.
8. Hamed K. H., Rao A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data // J. Hydrology. 1998. V. 204. P. 182–196. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X).
9. López-Carr D., Pricope N. G., Aukema J. E. et al. A spatial analysis of population dynamics and climate change in Africa: Potential vulnerability hot spots emerge where precipitation declines and demographic pressures coincide // Population and Environment. 2014. V. 35. P. 323–339. <http://dx.doi.org/10.1007/s11111-014-0209-0>.
10. Maan H. B. Non-parametric tests against trend // Econometrica. 1945. V. 13. No. 3. P. 245–259. <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>.

11. *Prakash S.* Performance assessment of CHIRPS, MSWEP, SM2RAIN-CCI, and TMPA precipitation products across India // *J. Hydrology*. 2019. V. 571. P. 50–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.036>.
12. *Sen P. K.* Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // *J. American Statistical Association*. 1968. V. 63. Iss. 324. P. 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.
13. *Sharifi E., Steinacker R., Saghafi B.* Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 2. Article 135. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8020135>.
14. *Sidhu N., Pebesma E., Câmara G.* Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case // *European J. Remote Sensing*. 2018. V. 51. Iss. 1. P. 486–500. <http://dx.doi.org/10.1080/22797254.2018.1451782>.
15. *Ullah W., Wang G., Ali G. et al.* Comparing multiple precipitation products against *in situ* observations over different climate regions of Pakistan // *Remote Sensing*. 2018. V. 11. No. 6. Article 628. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11060628>.
16. *Vos K., Splinter K. D., Harley M. D. et al.* CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery // *Environment Modelling and Software*. 2019. V. 122. Article 104528. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>.
17. *Wang Z., Zhong R., Lai C., Chen J.* Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility // *Atmospheric Research*. 2017. V. 196. P. 151–163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.020>.
18. *Yang X., Yong B., Hong Y. et al.* Error analysis of multi-satellite precipitation estimates with an independent rain gauge observation network over a medium-sized humid basin // *Hydrological Science J.* 2016. V. 61. Iss. 10. P. 1813–1830. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2015.1040020>.
19. *Zeleňáková M., Vido J., Portela M. M. et al.* Precipitation trend over Slovakia in the period 1981–2013 // *Water*. 2017. V. 9. No. 12. Article 922. <http://dx.doi.org/10.3390/w9120922>.

Analysis of long-term precipitation trends in the Southern Aral Sea region

S. B. Kalabaev^{1,2}, F. Ya. Artikova², B. E. Adenbaev²

¹ *Hydrometeorological Scientific Research Institute, Tashkent 100052, Uzbekistan*
E-mail: salauat.kalabaev@gmail.com

² *Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent 100174, Uzbekistan*

Global climate change and desiccation of the Aral Sea significantly affect both the dynamics and spatial distribution of precipitation in the Southern Aral Sea region, leading to ecosystem destabilization. This study analyzes spatial and temporal trends as well as the variability of annual, seasonal, and monthly precipitation in the Southern Aral Sea region, using meteorological station observations and gridded satellite datasets. Monthly precipitation data for the period 1981–2023 were obtained from the archival records of the Agency of Hydrometeorological Services of Uzbekistan (Uzhydromet) and, together with the grid products of daily precipitation, they were used to establish temporal changes and spatial distributions in the Southern Aral Sea region. Analysis of precipitation measurements at weather stations has shown that the Southern Aral Sea region has an annual downward trend in precipitation between 1981 and 2023, by an average of 7 mm per decade. Gridded precipitation data were obtained from CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station) and PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks — Climate Data Record). By utilizing the analytical capabilities of GEE (Google Earth Engine), we compared the spatial and temporal patterns of observed and remotely sensed precipitation data and demonstrate that remote sensing products can be reliably used in inaccessible areas where there are no weather stations. The main findings of this study indicate that CHIRPS-modeled precipitation shows a decrease in annual and seasonal precipitation by 1.73 and 1.0 mm respectively between 1981 and 2023, while ground-based observations indicate reductions of 8.8 and 2.5 mm.

Keywords: precipitation, Southern Aral Sea region, remote sensing, CHIRPS, PERSIANN-CDR, Google Earth Engine

Accepted: 02.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-317-332

References

1. Kalabaev S. B., Sultashova O. G., Changes in air temperature in the Southern Aral Sea region, *Vestnik Karakalpakskogo gosudarstvennogo universiteta im. Berdakha*, 2019, No. 2(43), pp. 17–19 (in Karakalpak).
2. Kalabaev S. B., Yuldoshbaeva M. R., Hydrographic description water bodies of lower Amudarya, *Izvestiya geograficheskogo obshchestva Uzbekistana*, 2019, No. 56, pp. 235–239 (in Uzbek).
3. Banerjee A., Chen R., Meadows M. et al., An analysis of long-term rainfall trends and variability in the Uttarakhand Himalaya using Google Earth Engine, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 4, Article 709, <https://doi.org/10.3390/rs12040709>.
4. Beck H. E., Vergopolan N., Pan M. et al., Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modelling, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, V. 21, No. 12, pp. 6201–6217, <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-6201-2017>.
5. Drápela K., Drápelová I., Application of Mann-Kendall test and the Sen's slope estimates for trend detection in deposition data from Bílý Kříž (Beskydy Mts, the Czech Republic) 1997–2010, *Beskydy*, 2011, V. 4, pp. 133–146.
6. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 202, pp. 18–27, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
7. Guo H., Chen S., Bao A. et al., Inter-comparison of high-resolution satellite precipitation products over Central Asia, *Remote Sensing*, 2015, V. 7, No. 6, pp. 7181–7211, <https://doi.org/10.3390/rs70607181>.
8. Hamed K. H., Rao A. R., A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data, *J. Hydrology*, 1998, V. 204, pp. 182–196, [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X).
9. López-Carr D., Pricope N. G., Aukema J. E. et al., A spatial analysis of population dynamics and climate change in Africa: Potential vulnerability hot spots emerge where precipitation declines and demographic pressures coincide, *Population and Environment*, 2014, V. 35, pp. 323–339, <http://dx.doi.org/10.1007/s11111-014-0209-0>.
10. Maan H. B., Non-parametric tests against trend, *Econometrica*, 1945, V. 13, No. 3, pp. 245–259, <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>.
11. Prakash S., Performance assessment of CHIRPS, MSWEP, SM2RAIN-CCI and TMPA precipitation products across India, *J. Hydrology*, 2019, V. 571, pp. 50–59, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.036>.
12. Sen P. K., Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *J. American Statistical Association*, 1968, V. 63, Iss. 324, pp. 1379–1389, <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.
13. Sharifi E., Steinacker R., Saghafian B., Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results, *Remote Sensing*, 2016, V. 8, No. 2, Article 135, <http://dx.doi.org/10.3390/rs8020135>.
14. Sidhu N., Pebesma E., Câmara G., Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case, *European J. Remote Sensing*, 2018, V. 51, Iss. 1, pp. 486–500, <http://dx.doi.org/10.1080/22797254.2018.1451782>.
15. Ullah W., Wang G., Ali G. et al., Comparing multiple precipitation products against *in situ* observations over different climate regions of Pakistan, *Remote Sensing*, 2018, V. 11, No. 6, Article 628, <http://dx.doi.org/10.3390/rs11060628>.
16. Vos K., Splinter K. D., Harley M. D. et al., CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery, *Environment Modelling and Software*, 2019, V. 122, Article 104528, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>.
17. Wang Z., Zhong R., Lai C., Chen J., Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility, *Atmospheric Research*, 2017, V. 196, pp. 151–163, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.020>.
18. Yang X., Yong B., Hong Y. et al., Error analysis of multi-satellite precipitation estimates with an independent rain gauge observation network over a medium-sized humid basin, *Hydrological Science J.*, 2016, V. 61, Iss. 10, pp. 1813–1830, <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2015.1040020>.
19. Zeleňáková M., Vido J., Portela M. M. et al., Precipitation trend over Slovakia in the period 1981–2013, *Water*, 2017, V. 9, No. 12, Article 922, <http://dx.doi.org/10.3390/w9120922>.