



Изменчивость и изменение климата в Узбекистане: анализ данных CHELSA с высоким разрешением

Махмуд Хайдаров¹, Ларс Герлиц^{2*}

¹Центр гидрометеорологической службы Республики Узбекистан (Узгидромет)

²Потсдамский центр им. Гельмгольца, Немецкий центр исследования Земли, Секция 4.4 «Гидрология»

*для корреспонденции: lars.gerlitz@gfz-potsdam.de

Данная версия является переводом статьи «Climate variability and change over Uzbekistan – an analysis based on high resolution CHELSA data», опубликованной в журнале 14 ноября 2019 г.

MPNТИ 37.23.29

doi: 10.29258/CAJWR/2019-R1.v5-2/1-22.rus

Аннотация

*Изменение и изменчивость климата представляют серьезные риски для экономик стран Центральной Азии (ЦА), особенно для их сельскохозяйственных и энергетических отраслей. Для оценки соответствующих воздействий требуется детально анализировать текущие климатические изменения. Однако после распада Советского Союза наблюдательная сеть в ЦА значительно деградировала, особенно в уязвимых высокогорных регионах (Unger-Shayesteh et al., 2013). В настоящее время проводится модернизация сети гидрометеорологических наблюдений Узгидромета. Данные высокого разрешения с координатной привязкой дают широкие возможности по преодолению информационных вызовов ввиду своей свободной доступности для всех ученых и практиков, равно как и потенциала осуществления трансграничного мониторинга климатических условий. Авторы настоящего исследования обратили свое внимание на набор данных «Климатология высокого разрешения для участков земной поверхности» (англ. Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas, CHELSA), содержащий ежемесячные серии данных по осадкам и температурам для всего земного шара с разрешением 1*1 км за период 1979-2013 гг. В рамках исследования данные CHELSA были сопоставлены с данными 20 наблюдательных станций, расположенных на территории Узбекистана, и продемонстрирована их согласованность в большинстве случаев, за исключением незначительных отклонений по показателям среднесезонных температур и объемов осадков. Кроме этого, набор данных CHELSA хорошо отражает тренды по температурам и осадкам, а также их связь с глобальными режимами атмосферной циркуляции, такими как Эль-Ниньо и Североатлантическая осцилляция. Таким образом, исследовательская группа делает вывод о том, что данные CHELSA могут служить приемлемой основой для изучения вариативности и изменения климата в Центральной Азии.*

Ключевые слова: изменение климата, анализ трендов, данные с координатной привязкой, Узбекистан.

Тип статьи: научно-исследовательская статья.

1. Введение

Изменение климата – одна из важнейших современных проблем человечества. За последние годы климат Земли существенно изменился. Причиной изменений являются как природные, так и антропогенные факторы. Глобальное повышение средней температуры в результате изменения климата приводит к таянию ледников, повышению уровня моря и увеличению площади пустынь. Последствия изменения климата проявляются в изменении частоты, интенсивности, пространственной протяженности, продолжительности и времени экстремальных погодных и климатических явлений (IPCC, 2014). Неблагоприятные последствия изменения климата носят повсеместный и глобальный характер. По этой причине важно учитывать последствия изменения климата для различных секторов экономики, включая сельское хозяйство, а также водоснабжение, энергетику, здравоохранение и другие.

Узбекистан входит в число стран, наиболее уязвимых к изменению климата. В частности, выявлено, что региональная водная безопасность сильно зависит от климатических изменений. Кроме того, известно, что климатические изменения представляют угрозу производительности сельского хозяйства и, следовательно, экономической и политической стабильности в регионе (Aleksandrova et al., 2016; Siegfried et al., 2012). Темпы потепления превышают средние темпы, наблюдаемые в глобальном масштабе (Uzhydromet & UNEP, 2016).

Многие исследования сходятся во мнении, что наибольшие тенденции потепления в Центральной Азии наблюдаются в зимний период (например, Giese et al., 2007), но, напротив, существует ряд исследований, которые показали, что преобладают летние и осенние тенденции (Unger-Shayesteh et al., 2013; Chub, 2007). Unger-Shayesteh et al. (2013) отмечают, что тенденция среднегодовой температуры наиболее выражена в низменностях и защищенных внутригорных долинах; скорее всего, это связано с тем, что большинство станций в низинах расположены вблизи или непосредственно в населенных пунктах и городах и, таким образом, подвержены воздействию урбанизации, которая оказывает согревающее влияние на местный микроклимат. По данным Chub (2007), потепление в Узбекистане существенно различается в разные сезоны года. Значительное повышение среднемесячной температуры воздуха наблюдается летом и осенью. В период 1938–2002 гг. температура воздуха в Узбекистане повышалась в среднем на 0,27 °C каждые 10 лет. Наибольшие изменения температуры (0,3–0,43 °C за 10 лет) наблюдались на севере Узбекистана и в крупных городах, наименьшие (0,10–0,14 °C за 10 лет) – в горных районах (Chub and Spectorman, 2016).

Основываясь на сеточном наборе данных, подготовленном Отделом климатических исследований (CRU – Climate Research Unit), Chen et al. (2011) показывают, что ежегодные осадки несколько увеличились в юго-западном Казахстане, Туркменистане и Узбекистане в период 1930–2009 гг. В 1940–1970 гг. наблюдались частые летние засухи. С середины 1970 гг. количество осадков постепенно

увеличивалось во все сезоны, что привело к ежегодному росту за последние 30 лет. Наибольшее увеличение количества осадков приходится на зимний сезон. Напротив, анализ, проведенный на основе 50 метеорологических станций в различных регионах Узбекистана за период 1950–2013 гг., показал слабые отрицательные тенденции годовых осадков в большинстве случаев (Chub and Spectorman, 2016). В горных районах Узбекистана в весенне-летний и осенний периоды наблюдается тенденция к уменьшению количества осадков, а в зимние месяцы преобладают положительные тенденции.

Помимо постепенного изменения температуры и количества осадков, климат Узбекистана характеризуется выраженной изменчивостью в межгодовых масштабах. Некоторые исследования показывают, что тропические режимы циркуляции (в частности, Эль-Ниньо – Южное колебание (ENSO – El Niño-Southern Oscillation), см., например, Rasmusson and Wallace, 1983) и западные режимы циркуляции (такие, как Североатлантическое колебание (NAO – North Atlantic Oscillation), см. Hurrell, 1995) оказывают сильное воздействие на климат Центральной Азии, поскольку они влияют на характер ветров в Северном полушарии и, следовательно, на перенос влаги в регион (Syed et al., 2010; Barlow et al., 2015). Таким образом, климатические изменения в Центральной Азии являются результатом антропогенных выбросов парниковых газов, приводящих к глобальному потеплению и изменению характеристик циркуляции (Gerlitz et al., 2018, 2016; Barlow et al., 2015; Syed et al., 2006, 2010).

Большинство исследований изменчивости и изменения климата в Центральной Азии основаны на ограниченном количестве станций или на сеточных наборах климатических данных с грубым пространственным разрешением (обзор исследований, связанных с изменением климата в Центральной Азии, см. в: Unger-Shayesteh et al., 2013). Таким образом, климатические характеристики местного масштаба и их изменения недостаточно изучены, что затрудняет оценку последствий изменения климата и реализацию адекватных стратегий адаптации. На этом фоне в представленном исследовании используется новейший сеточный набор данных с высоким разрешением (1 км × 1 км), предоставляющий информацию о пространственно-временном изменении среднемесячной температуры воздуха и осадков за период 1979–2013 гг. Набор данных CHELSA (Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas, Karger et al., 2017) выделяется своим очень высоким пространственным разрешением, но до сих пор не был оценен и проанализирован для Центральной Азии и Узбекистана. Для оценки качества набора данных CHELSA авторы анализируют сеточные поля температуры и осадков по наблюдениям с 20 метеорологических станций, обслуживаемых Узгидрометом. Сеточный набор данных проверяется на основе отклонения и корреляционного анализа. Далее анализируются изменения средней сезонной температуры и суммы сезонных осадков на основе полей с высоким разрешением и сравниваются с локальными измерениями на местах. В заключение авторы анализируют сеточные данные CHELSA, а также наблюдения за их статистической связью с глобальными природными явлениями, в частности с Эль-

Ниньо (ENSO) и Североатлантическим колебанием (NAO). Наша главная цель – представить свободно доступный набор данных CHELSA в качестве перспективной альтернативы для исследования региональных климатических изменений в Центральной Азии. Это имеет особое значение для регионов, которые страдают от ограниченного количества станционных наблюдений, как, например, Узбекистан. Основываясь на своих выводах, авторы показывают, что набор климатических данных CHELSA с высоким разрешением предлагает большой потенциал для анализа климатических колебаний и изменений, особенно в регионах с дефицитом данных, таких как Центральная Азия.

2. Данные и методы

2.1. Данные

Сеточные климатические данные с высоким разрешением (CHELSA, версия 1.1) были загружены с веб-страницы CHELSA за период с 1979 по 2013 год. Набор данных находится в свободном доступе по адресу <http://chelsa-climate.org> (последний доступ: 14 сентября 2018 года). CHELSA – это набор данных о климате с высоким разрешением (30 угловых секунд, ~ 1 км), который предоставляет климатическую информацию для участков земной поверхности по всему земному шару. Он был разработан учеными-климатологами географического факультета Гамбургского университета, Цюрихского университета и Геттингенского университета. CHELSA включает в себя месячные значения средней температуры и осадков за период 1979–2013 гг. Климатические данные хранятся в формате GeoTIFF и могут использоваться с любым стандартным ГИС-приложением, а также с современными скриптовыми и программными средами, такими как Python или R. Климатические данные CHELSA основаны на квазимеханическом статистическом даунскейлинг-подходе глобального реанализа ERA-Interim. (Dee et al., 2011). Климатические данные с высоким разрешением генерируются на основе статистического подхода, учитывающего взаимосвязь между крупномасштабными климатическими данными и локальными особенностями рельефа. Статистический подход также включает коррекцию отклонения, основанную на сеточных данных GPCC (Global Precipitation Climatology Centre – Глобальный центр климатологии осадков) (Karger et al., 2017; Schneider et al., 2014).

Все продукты CHELSA находятся в географической системе координат, привязанной к горизонтальной линии WGS 84, с горизонтальными координатами, выраженными в десятичных градусах. Данные о температуре CHELSA хранятся в единицах Кельвина * 10, то есть извлеченные данные должны быть преобразованы в °C по: $T [^{\circ}\text{C}] = X/10 - 273,15$.

Данные о среднемесячной температуре воздуха и сумме осадков на 20 метеостанциях в горных и низменных районах получены из наблюдательной сети Узгидромета. Все станции нанесены на карту на рис. 1, а их высоты приведены в таблице I.

Среднемесячные уведомления о Североатлантическом колебании (NAO) и Южном колебании Эль-Ниньо (Niño 3.4) получены с веб-приложения KNMI Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl>, last access September 15 2018).

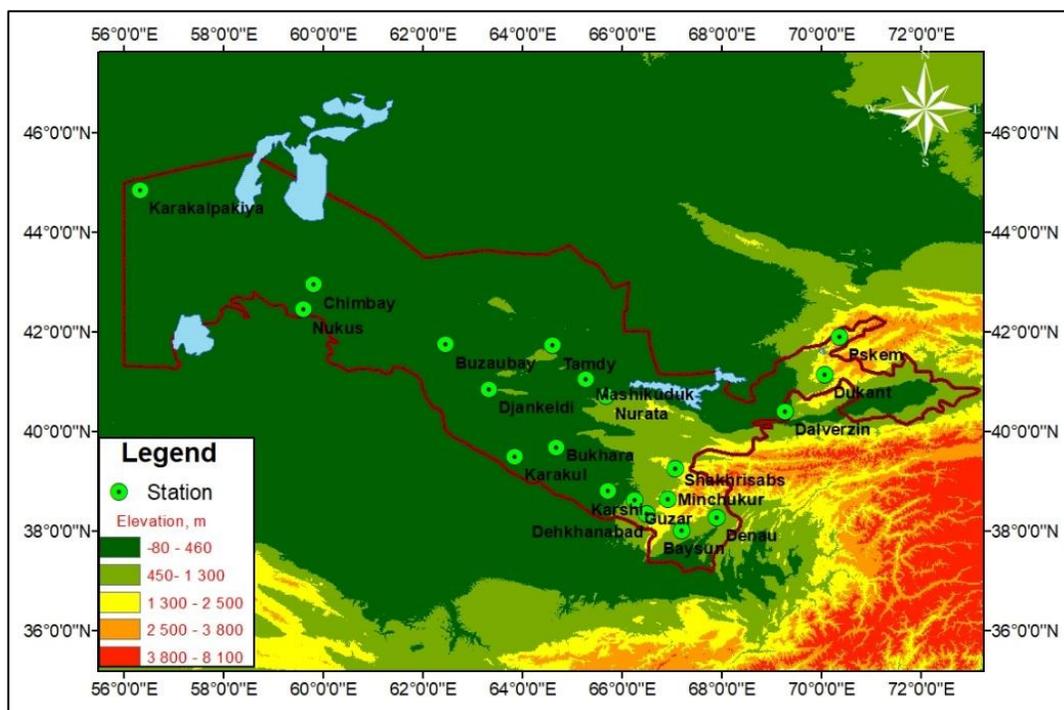


Рисунок 1. Расположение метеостанций, использованных в представленном исследовании. Станции обслуживает Узгидромет.

Таблица I. Метеорологические станции, используемые для оценки набора данных CHELSA и их соответствующие высоты. Расположение станций показано на рис. 1.

Название станции	Высота [м]	Название станции	Высота [м]
Байсун	1249	Каракалпакия	130
Базаубай	98	Каракуль	196
Бухара	230	Карши	376
Чимбай	66	Машикудук	201
Дальверзин	524	Минчукур	2117
Денау	521	Нукус	77
Дехканабад	841	Нурата	485
Джангельды	211	Пскем	1258
Дукант	2001	Шахрисабз	633
Гузар	524	Тамды	238

2.2. Методы

Авторы извлекли среднемесячные температуры и суммы осадков для мест расположения станций из сетчатого набора данных CHELSA на основе метода ближайшего соседа. Никаких методов интерполяции или коррекции высот не применялось. Рассчитаны средние многолетние значения температуры и осадков за зимний (декабрь, январь, февраль), весенний (март, апрель, май), летний (июнь, июль, август) и осенний (сентябрь, октябрь, ноябрь) сезоны. Расчеты проводились на основе данных CHELSA и наблюдательной метеорологической сети.

Для оценки данных CHELSA рассчитывается отклонение между сеточными данными и сетью метеорологических наблюдений для каждого сезона. Сезонное отклонение температуры (°C) рассчитывается для каждой станции как разница между средней температурой станции и средней температурой CHELSA, которая извлекается для местоположения станции. Отклонение осадков для каждого сезона рассчитывается в процентах как разница между данными CHELSA и наблюдаемыми суммами осадков (%), чтобы обеспечить сопоставимые значения для сухих и влажных мест. Для станций с расхождениями в данных более 20 % от месячных значений расчеты не проводились. Если пробелы в данных составляли менее 20 %, недостающие данные заменялись среднемесячной суммой осадков или средним значением температуры соответственно.

Расчет трендов для оценки изменения климата является общепринятым методом. Тренд определяется как постепенное изменение случайной величины за все рассматриваемое время, полученное путем устранения короткопериодических флуктуаций. Тренд может быть частью флуктуации, если период флуктуации больше, чем запись наблюдений, что необходимо учитывать для интерпретации результатов (Hess et al., 2001). В представленном исследовании авторы оценивают изменения температуры и осадков с помощью линейного тренда. Для анализа пространственной структуры трендов анализ применяется к сеточным данным CHELSA. Далее тренды рассчитываются для каждой метеостанции и для извлеченных данных CHELSA для соответствующих местоположений.

Линейный тренд определяется как:

$$y = ax + b,$$

где a – угол наклона, b – пересечение оси y .

Для оценки значимости линейных трендов авторы используют непараметрический критерий Манна-Кендалла для монотонных трендов, основанный на коэффициенте ранговой корреляции Кендалла (Hess et al., 2001; Kendall, 1938). В статистике коэффициент ранговой корреляции Кендалла, обычно называемый коэффициентом Кендалла τ (tau), используется для измерения порядковой связи между двумя измеряемыми величинами. t -критерий является непараметрическим критерием гипотезы статистической зависимости, основанной на коэффициенте τ . Сравнивая все возможные пары значений, авторы могут сказать, что любая пара наблюдений (x_i , y_i) и

(x_j, y_j) является согласованной, если ранги для обоих элементов следуют в одном направлении: то есть, $x_i > y_i, x_j > y_j$ или $x_i < y_i, x_j < y_j$ и диссонирует, если $x_i > y_i, x_j < y_j$ или $x_i < y_i, x_j > y_j$.

Коэффициент Кендалла K определяется как:

$$\tau = \frac{(\text{количество совпадающих пар}) + (\text{количество несовпадающих пар})}{n(n-1)/2}$$

Тренд считается статистически значимым, если уровень достоверности составляет 95 % и выше, то есть вероятность его случайного возникновения невелика. Тест Манна-Кендалла проводится для оценки значимости трендов, полученных из климатических данных сети метеорологических наблюдений, а также для извлеченных данных CHELSA.

Согласно исследованиям Gerlitz et al. (2016), Barlow et al. (2015) и Syed et al. (2006), глобальные климатические явления ENSO и NAO оказывают косвенное влияние на изменение типов погоды в Центральной Азии из-за их влияния на крупномасштабную атмосферную циркуляцию. Для количественной оценки взаимосвязи между климатическими индексами и метеорологическими элементами в Узбекистане ежемесячные значения Североатлантического колебания и Эль-Ниньо агрегируются для каждого сезона. Коэффициент корреляции Пирсона вычисляется между средними сезонными индексами и сезонными значениями температуры и осадков для каждой ячейки набора растровых данных CHELSA и для стационарных наблюдений.

Все расчеты проводятся с помощью свободно доступной скриптовой среды R (версия R-3.6.1), которая предоставляет широкий спектр статистических функций и методов для анализа численных и сеточных данных (R Development Core Team, 2008).

3. Результаты

3.1. Климатические характеристики и отклонение данных CHELSA

Средние значения сезонной температуры воздуха за период 1979–2013 гг. по данным CHELSA представлены на рис. 2. Анализ показывает, что в зимний период средняя температура колеблется от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ в горах до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ на южных равнинах. Весной температура в горах достигает $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, на южных равнинах превышает $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Летом средняя температура воздуха в северных районах составляет около $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, в южных – до $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Осенью температура воздуха в южных и юго-западных областях Узбекистана составляет $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, в северных районах около $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, в горах около $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отклонения температурных наблюдений метеорологической сети и значений, полученных от CHELSA, строится для местоположений станций (рис. 2; синий цвет – отрицательный, т. е. данные CHELSA холоднее наблюдений, красный – положительный). Отклонение в зимний период колеблется от $-3,5$ до $0,99\text{ }^{\circ}\text{C}$, в

большинстве случаев значения находятся между $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Только три станции (Дальверзин, Минчукур, Шахрисабз) показывают большее отклонение – более $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (таблица II). Все эти станции расположены в горных районах. Весной отклонения колеблются между $-4,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $2,04\text{ }^{\circ}\text{C}$. Большое отклонение (более $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдается на двух метеорологических станциях в горных районах (Дукант, Шахрисабз, см. таблицу II). Наибольшие отклонения наблюдаются в летний период. Только на 9 станциях отклонение ниже $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, в большинстве случаев в пределах $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, две горные станции показывают большое отклонение между $-2,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-5,79\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Минчукур, Шахрисабз). Осенью отклонение на трех горных станциях достигает значений выше $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Во всех остальных случаях наблюдаются отклонения между $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. таблицу II).

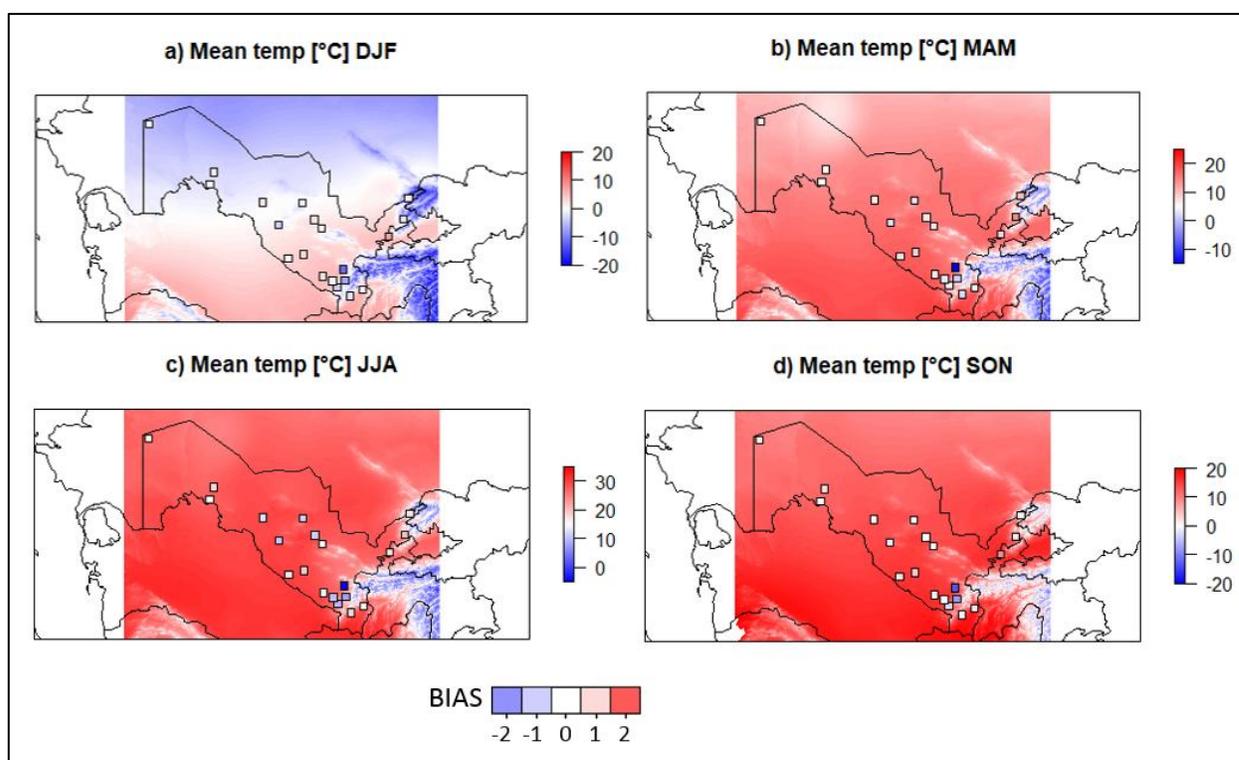


Рисунок 2. Средняя сезонная температура воздуха [$^{\circ}\text{C}$] в Узбекистане за 1979–2013 гг. (по данным CHELSA) и отклонение [$^{\circ}\text{C}$], рассчитанные для 20 метеостанций.

Отклонение рассчитывается как разница между наблюдениями станции и соответствующими значениями CHELSA, то есть отрицательное (положительное) отклонение указывает на то, что CHELSA холоднее (теплее), чем наблюдения.

Обратите внимание, что для разных сезонов используются разные шкалы.

Значения средних сезонных осадков за период 1979–2013 гг. по данным CHELSA представлены на рис. 3. Зимой среднее количество осадков в северной и центральной низменности Узбекистана составляет около 50 мм, в предгорьях и горах суммы осадков

достигают значений 200–250 мм. На западных склонах гор средние суммы осадков превышают 300 мм. Весной среднее количество осадков на северных и центральных равнинах Узбекистана колеблется в пределах 50–100 мм, в южных районах – 150–170 мм. Предгорные районы получают около 200 мм, высокогорные – до 370 мм. Летний период считается самым засушливым сезоном в Узбекистане. Среднее количество осадков достигает 10 мм на равнинах, 30–40 мм на северо-западе и до 130 мм в горных районах. Осенью среднее количество осадков наименьшее в центральной части Узбекистана (10 мм). На северо-западе сумма осадков достигает 50 мм, в предгорных районах – 100 мм, в горах на северо-востоке – до 220 мм.

Отклонение между средними суммами осадков, наблюдаемыми метеорологической сетью, и суммами, извлеченными из CHELSA за период 1979–2013 гг., показано на рис. 3 и приведено в таблице II. Красный цвет указывает на отрицательное смещение, то есть значения CHELSA ниже, чем наблюдения, синий – на положительные отклонения. Станции с недостаточными данными наблюдений отмечены черным цветом, следовательно, расчеты для этих мест не производились.

Отклонение средних сумм осадков относительно больше, чем отклонение средней температуры. Как и в случае с температурой, наибольшие отклонения наблюдаются в горных районах. В зимний период большое отклонение – от 40 % до 50 % наблюдается на трех горных метеостанциях (Пскем, Дукант, Шахрисабз, см. таблицу II), для всех остальных метеостанций происходит колебание от 2 % до 24 %. Точно так же весной наибольшее отклонение наблюдается на 3 горных метеостанциях (Нурата, Пскем, Дукант). Сезонно наибольшие процентные отклонения наблюдаются летом и осенью, со значениями от 10 % до 40 %. Однако, поскольку это засушливые сезоны в Узбекистане, абсолютное отклонение довольно низкое.

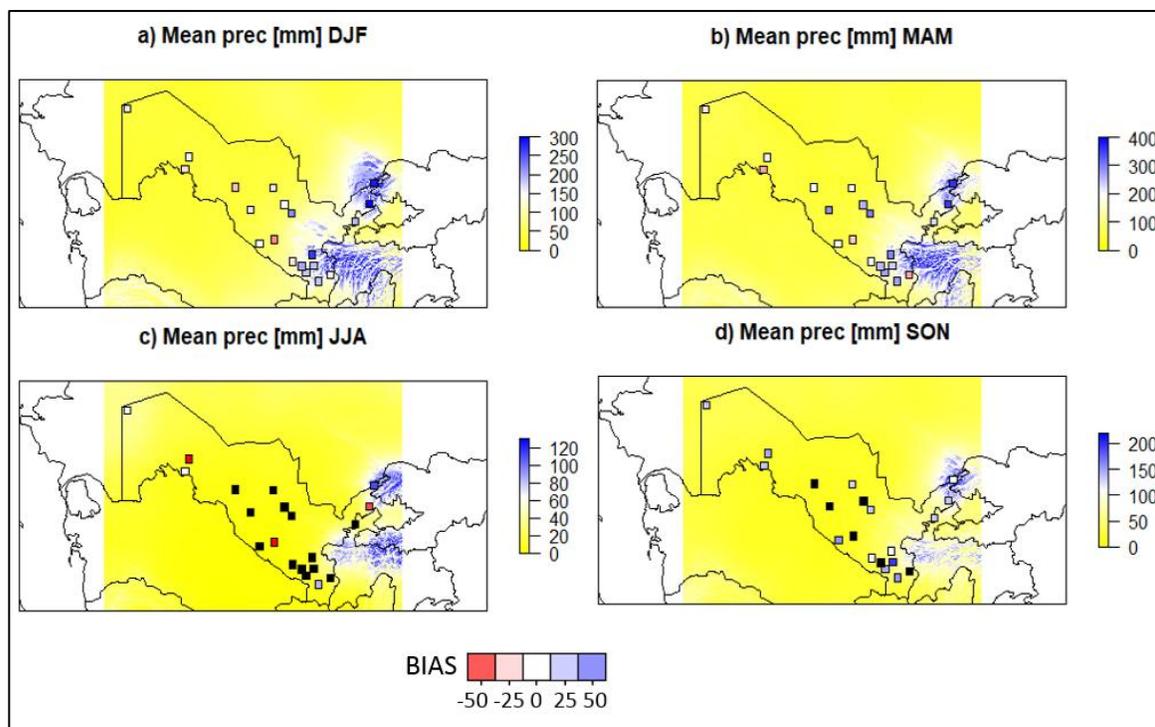


Рисунок 3. Среднее сезонное количество осадков [мм] в Узбекистане за 1979–2013 гг. (на основе CHELSA) и процентное отклонение набора данных CHELSA [%].

Отклонение рассчитывается как процентная разница между наблюдениями станции и соответствующими значениями CHELSA, то есть отрицательное (положительное) отклонение указывает на то, что значения CHELSA влажнее (суше), чем наблюдения. Цветовая шкала отклонения перевернута по сравнению с рис. 2 (синий цвет соответствует отклонению с более влажными отклонениями). Обратите внимание, что для разных сезонов используются разные шкалы.

Таблица II. Отклонение(Δ) сезонной средней температуры (T , °C) и сезонных сумм осадков (P , %) для каждого сезона (DJF – зима, MAM – весна, JJA – лето, SON – осень)

Станция	ΔT (DJF)	ΔT (MAM)	ΔT (JJA)	ΔT (SON)	ΔP (DJF)	ΔP (MAM)	ΔP (JJA)	ΔP (SON)
Байсун	-0,75	-0,75	1,15	0,45	-11,8	20,6	29,8	-22,9
Бузаубай	0,80	0,41	-0,87	0,22	14,5	2,72	NA	NA
Бухара	0,99	0,93	1,31	1,3	24,4	11,6	50,3	NA
Чимбай	0,40	0,08	0,9	0,89	-3,17	5,75	36,9	-18,4
Дальверзин	2,31	0,85	0,9	2,76	-14,7	10,5	NA	-12,8
Денау	-0,08	-0,22	-0,28	0,51	4,83	18,7	NA	NA
Дехканабад	-1,28	-0,28	-1,69	-1,62	-11,8	-0,6	NA	-22,9

Джангельды	-1,11	-0,62	-1,39	-1,25	-5,06	23,6	NA	NA
Дукант	-0,67	2,04	1,55	0,56	-50,3	40,1	41,7	-40,3
Гузар	-0,32	-0,49	-1,53	-1,06	-18,1	15,2	NA	NA
Каракалпакия	0,17	0,33	0,4	0,54	-4,13	4,83	2,58	-13,2
Каракуль	0,18	0,66	0,66	0,81	1,67	3,87	NA	-2,16
Карши	0,92	0,48	-0,4	0,47	7,9	0,9	NA	8,93
Машикудук	0,87	0,5	-1,24	0,06	-0,35	17,5	NA	NA
Минчункур	-2,06	-0,88	-2,26	-2,84	-13,1	12,3	NA	-21,9
Нукус	0,37	-0,09	-0,15	0,21	8,3	18,7	20,8	-13,1
Нурата	-0,20	0,53	0,09	0,1	-23,6	27,3	NA	-28,5
Пскем	0,54	1,28	0,74	0,36	-46,1	41,4	41,9	-47,1
Шахрисабз	-3,37	-4,24	-5,79	-4,19	-39,6	25,9	NA	-31,3
Тамды	-0,49	-0,51	-1,2	-0,9	-4,66	3,41	NA	-10,9

3.2. Тенденции изменения температуры и осадков

Расчетные тренды сезонных средних температур за период 1979–2013 гг. (рис. 4 и таблица III) показывают, что тенденция потепления наблюдается практически на всей территории Узбекистана и во все сезоны года, за исключением зимнего. Анализ трендов с помощью теста Манна-Кендалла подтверждает значимость трендов на 18 станциях весной, на 9 станциях летом и на 12 станциях осенью. Никаких существенных тенденций для зимнего сезона выявлено не было. На карте отмечены станции со значимыми трендами. Наибольшее потепление наблюдается весной. Температурные тренды достигают значений до 0,1 °C в год ($p < 0,05$) в северных районах Узбекистана (станция Каракалпакия, см. таблицу III). Точно так же осень демонстрирует сильные положительные и статистически значимые температурные тренды. Отрицательные, но незначительные тенденции наблюдаются зимой в центральной и северо-западной частях Узбекистана. В целом тенденции наблюдений соответствуют трендовой структуре набора данных CHELSA, что указывает на то, что набор данных пригоден для исследований изменения климата.

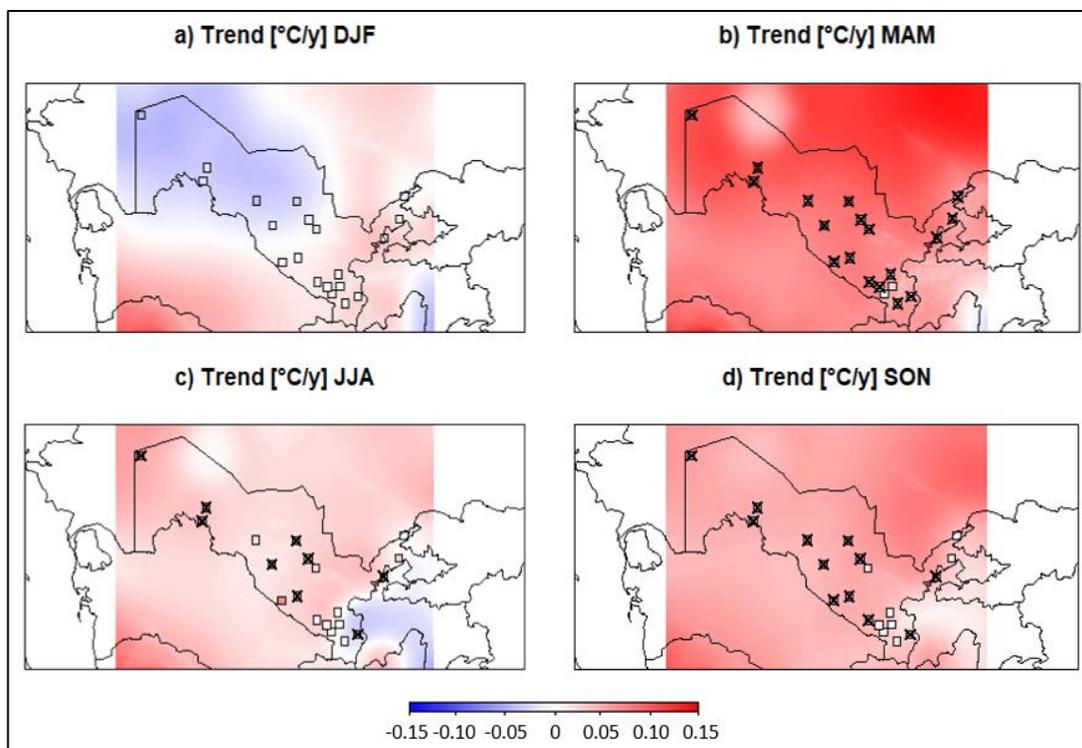


Рисунок 4. Тенденции изменения средней сезонной температуры в Узбекистане за 1979–2013 гг. [$^{\circ}\text{C}/\text{год}$]. Квадраты показывают тенденции в местах расположения станций (та же цветовая шкала). Крестик указывает на значимость на уровне 95 %.

Тенденции сезонных сумм осадков за период с 1979 по 2013 гг. показаны на рис. 5 и в таблице III. Значительные (положительные) тренды выявлены только для двух станций в зимний сезон (Дукант и Бузаубай). В целом в зимний период на всей территории Узбекистана наблюдается незначительная тенденция к увеличению количества осадков. Весной тренды выпадения осадков в основном отрицательные. Значимая (отрицательная) тенденция была выявлена только для одной станции, расположенной в центральной части страны (Машикудук, см. таблицу III). Летом и осенью существенных тенденций не наблюдается. Незначительные положительные тренды наблюдаются летом и осенью в горных районах.

Тренды температуры воздуха по данным метеостанций и по данным CHELSA в большинстве случаев не имеют существенной разницы. Исключение составляют сильно различающиеся тенденции для одной станции зимой (Бухара, см. таблицу III) и для 4 станций в летний сезон (Байсун, Дехканабад, Дукант и Машикудук). Точно так же тренды, рассчитанные для сезонных сумм осадков, почти одинаковы для наблюдений и данных CHELSA, за исключением незначительной разницы для 2–3 станций в каждом сезоне.

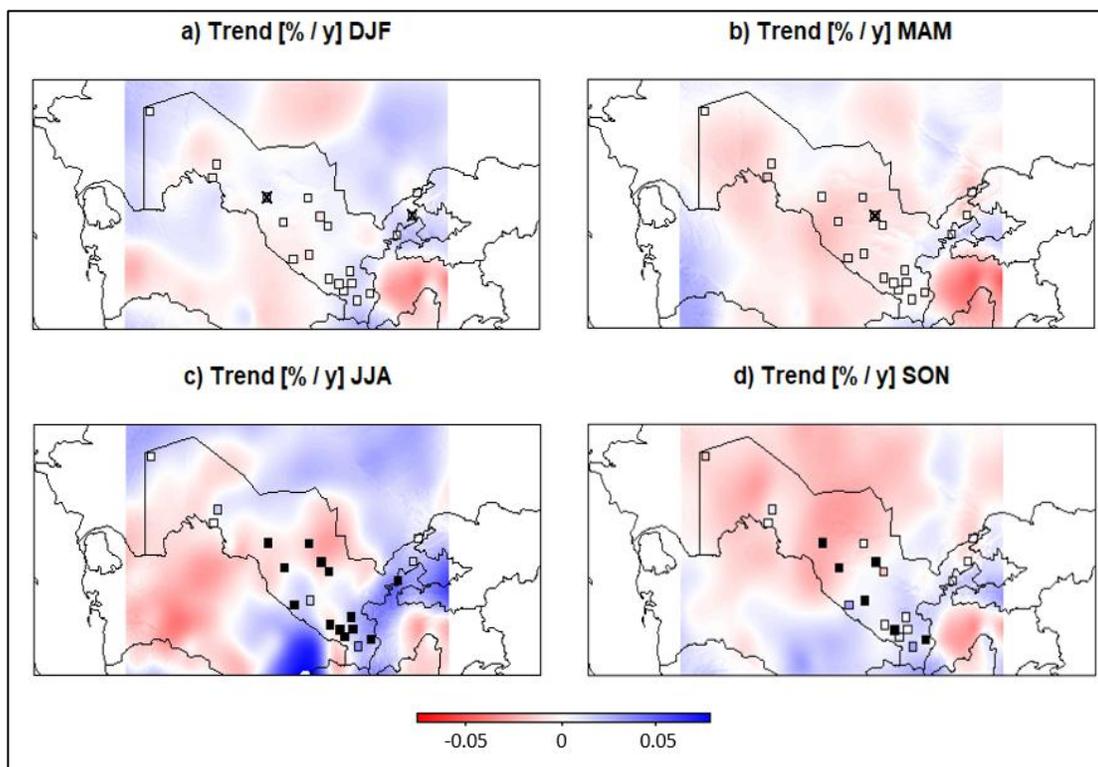


Рисунок 5. Тенденции [%/год] сезонных осадков по территории Узбекистана за 1979–2013 гг. в %/год. Квадраты показывают тренды стационарных наблюдений (та же цветовая шкала), крестик указывает на значимые тренды на уровне 95 %. Черные квадраты показывают станции с более чем 20 % пробелами в данных.

Таблица III. Тренды (Tr) сезонной средней температуры (T, °C/год) и сезонных сумм осадков (P, %/год) для каждого сезона (DJF – зима, MAM – весна, JJA – лето, SON – осень). Первое значение представляет тренд наблюдений; второе – тренд данных CHELSA (набл. / Chelsa). Значимые тенденции отмечены (*). NA – указывает на станции с недостаточным количеством данных.

Станция	Tr T (DJF)	Tr T (MAM)	Tr T (JJA)	Tr T (SON)	Tr P (DJF)	Tr P (MAM)	Tr P (JJA)	Tr P (SON)
Байсун	0,005 /0,02	0,06* /0,06*	0,01 /-0,01	0,03 /0,03	0,004 /0,007	0,001 /-0,002	0,04 /0,02*	0,03 /0,006
Бузаубай	-0,04 /-0,03	0,06* /0,08*	0,02 /0,02	0,05* /0,04*	0,02* /0,004	-0,002 /-0,009	NA/ -0,008	NA/ -0,02*
Бухара	-0,003 /0,007	0,05* /0,08*	0,03* /0,03*	0,04* /0,05*	-0,01 /-0,005	-0,01 /-0,008	0,02 /0,005	NA/ 0,003
Чимбай	-0,02 /-0,03	0,11* /0,09*	0,04* /0,03*	0,04* /0,05*	-0,006 /0,008	-0,007 /-0,005	0,02 /0,002	0,01 /-0,004
Дальверзин	0,01 /0,04	0,06* /0,07*	0,03* /0,02	0,04* /0,04*	0,003 /0,01	-0,0009 /-0,005	NA/ 0,02*	0,003 /0,01
Денау	-0,005	0,05*	0,04*	0,04*	0,003	-0,006	NA/	NA/

	/0,03	/0,06*	/0,02	/0,02	/0,0005	/-0,006	0,02*	0,007
Дехканабад	0,009 /0,01	0,04 /0,06*	-0,008 /0,01	0,02 /0,04*	0,004 /0,007	0,001 /-0,001	NA/ 0,001*	0,03 /0,006
Джангельды	-0,01 /-0,01	0,09* /0,07*	0,03* /0,01	0,04* /0,04*	0,006 /-0,003	-0,008 /-0,01	NA/ -0,005	NA/ -0,01
Дуكانт	0,007 /0,01	0,08* /0,06*	0,03 /-0,0002	0,03 /0,03	0,01* /0,003	-0,003 /-0,004	0,01 /0,01	0,002 /-0,002
Гузар	0,0001 /0,02	0,05* /0,07*	0,009 /0,02*	0,02 /0,04*	-0,005 /0,005	-0,0007 /-0,003	NA/ 0,0002*	NA/ 0,005
Каракалпакия	-0,04 /-0,04	0,1* /0,1*	0,05* /0,05*	0,05* /0,05*	0,003 /0,01	-0,001 /-0,003	0,006 /0,02	-0,02/ -0,008
Каракуль	0,01 /0,008	0,06* /0,07*	0,07 /0,07*	0,05* /0,05*	-0,005 /- 0,005	-0,01 /-0,01	NA/ 0,01	0,006 /0,004
Карши	0,007 /0,01	0,05* /0,07*	0,006 /0,03*	0,03* /0,05*	0,002 /0,003	-0,01 /-0,006	NA/ -0,006	-0,006/ 0,004
Машикудук	-0,009 /-0,07	0,08* /0,08*	0,02* /0,03*	0,05* /0,05*	-0,008 /0,002	-0,02* /-0,006	NA/ 0,02	NA/ -0,003
Минчукур	0,003 /0,02	0,06 /0,05*	0,0009 /-0,002	0,01 /0,03	0,004 /0,009	-0,003 /-0,001	NA/ 0,02*	0,02 /0,01
Нукус	-0,02 /-0,03	0,1* /0,09*	0,04* /0,03*	0,04* /0,05*	-0,009 /0,001	-0,02 /-0,01	0,007 /-0,001	-0,005 /0,009
Нурата	-0,0009 /-0,0008	0,08* /0,07*	0,02 /0,03*	0,03 /0,05*	-0,0006 /0,003	-0,0006 /0,005	NA/ -0,009	-0,003 /0,02
Пскем	-0,01 /-0,001	0,05* /0,06*	0,0009 /0,008	0,02 /0,04*	0,009 /-0,0009	-0,005 /-0,009	-0,0007 /0,004	-0,004 /-0,007
Шахрисабз	0,009 /0,02	0,05* /0,06*	0,004 /0,02	0,02 /0,04*	-0,001 /0,006	-0,005 /-0,006	NA/ 0,02	0,01 /0,01
Тамды	-0,03 /-0,03	0,09* /0,08*	0,02* /0,02	0,05* /0,05*	-0,003 /0,004	-0,01 /-0,01	NA/ -0,02	-0,009 /-0,009

3.3. Взаимосвязь температуры и осадков с ENSO и NAO

Результаты корреляционного анализа Пирсона между сезонными колебаниями NAO и средней температурой воздуха в Узбекистане представлены на рис. 6а–д. Зимой на северо-западе получена положительная корреляция до $r = 0,4$ ($p < 0,05$). Юго-восток характеризуется отрицательными корреляциями до $-0,4$ ($p < 0,05$) в горных районах. Весной и осенью отрицательная корреляция между температурой и NAO наблюдается по всему Узбекистану с максимальными значениями до $r = -0,4$. Также летом корреляция отрицательная почти по всей территории с максимальными значениями до $r = -0,5$ на северо-западе. Исключение составляют юго-восточные горные районы, где летом наблюдается слабая положительная корреляция с NAO (до $r = 0,25$).

Анализ корреляции между средней температурой и ENSO показан на рис. 6е–h. В зимний период положительная корреляция наблюдается по всему Узбекистану с максимальными значениями до $r = 0,4$ ($p < 0,05$) в северо-восточных горных районах. В весенний период на всей территории Узбекистана отмечается отрицательная корреляция между температурой и ENSO с максимальными значениями до $r = 0,4$

($p < 0,05$) в восточной части страны. Летом выявлена слабая отрицательная (несущественная) корреляция. Осенью также наблюдается отрицательная корреляция по всей территории с максимальными значениями на северо-западе страны.

Таким образом, как ENSO, так и NAO оказывают негативное влияние на сезонные температуры в Узбекистане в большинстве сезонов, за исключением зимы.

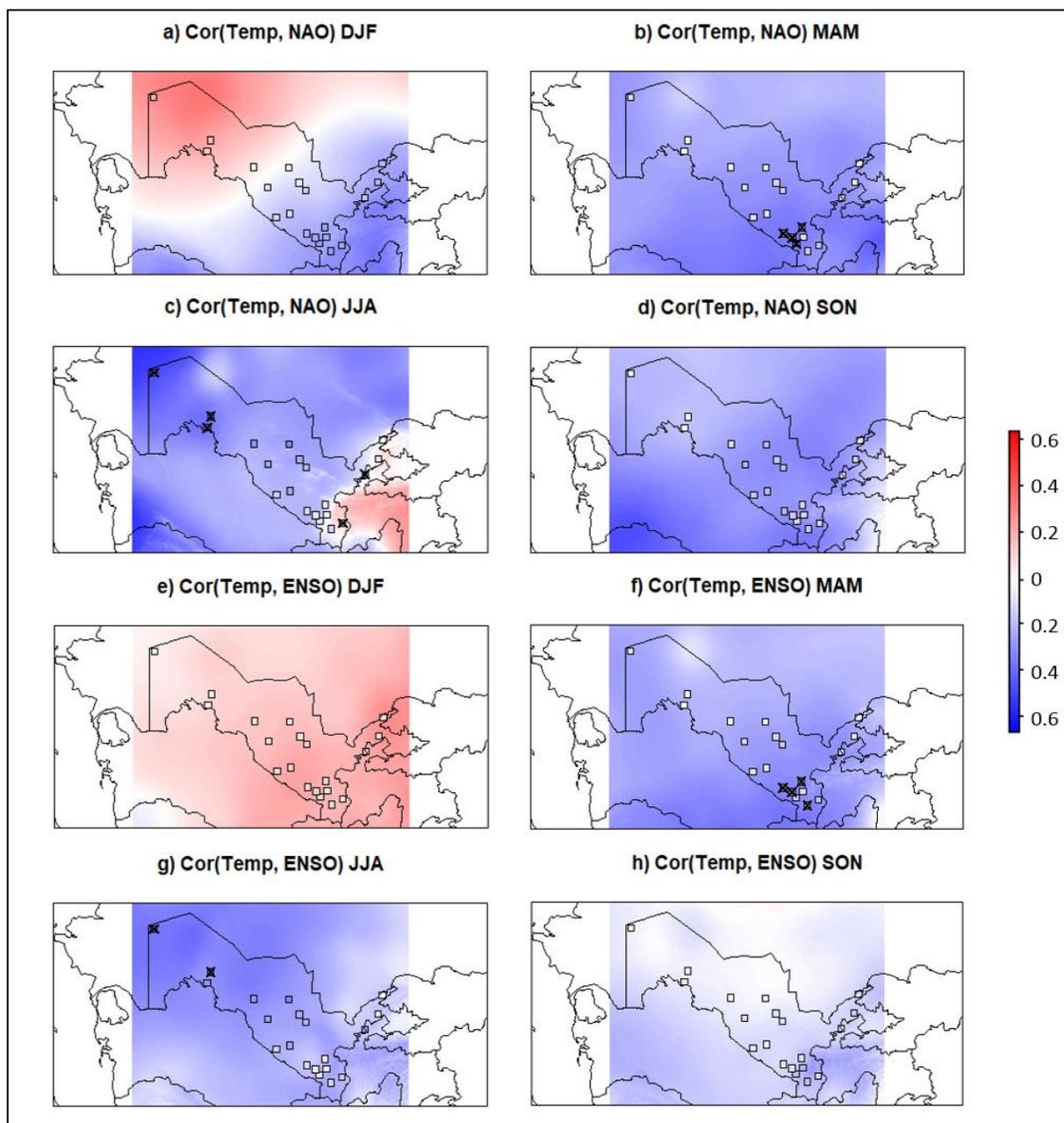


Рисунок 6. Корреляция между средней сезонной температурой и индексами NAO и ENSO за 1979–2013 гг. Квадраты указывают на корреляцию для наблюдений станции (та же цветовая шкала). Значимые корреляции ($p \leq 0,05$) отмечены (x).

Корреляция между сезонным количеством осадков и NAO показана на рис. 7а–д. Слабая корреляция обнаруживается в зимний период, она колеблется от отрицательной в центральной, северо-западной и северо-восточной частях Узбекистана до положительной в юго-восточной. Наибольшая корреляция наблюдается летом и осенью. Летом положительная корреляция отмечается в центральной и северо-западной части территории. Отрицательная корреляция прослеживается в юго-восточной и северо-восточной частях страны с максимальными значениями до $r = 0,6$ ($p < 0,05$). Осенью положительная корреляция наблюдается на всей территории Узбекистана с максимальными значениями до $r = 0,6$ ($p < 0,05$) в Приаралье и на юге страны.

Корреляция между сезонными количествами осадков и ENSO (рис. 7е–h) имеет положительные значения по всему Узбекистану в зимний сезон, с максимальными коэффициентами корреляции до $r = 0,4$ ($p < 0,05$) в горных районах на северо-востоке страны. Весной корреляция имеет максимальные положительные значения в центральной и северо-восточной частях Узбекистана, где достигает значений от $r = 0,5$ до $r = 0,6$ ($p < 0,05$). В летний сезон положительная корреляция наблюдается на западе и в центральной части страны, отрицательная – на северо-востоке и юго-востоке. Осенью корреляция между осадками и ENSO положительная, но очень слабая.

Таким образом, влияние NAO на сезонное количество осадков по Узбекистану не очень ясно, и обнаруживаются как положительные, так и отрицательные значения. Влияние ENSO положительно во все сезоны года с максимальными корреляциями в зимний сезон. Это указывает на возможность сезонного прогноза осадков, предложенного Gerlitz et al. (2016, 2018).

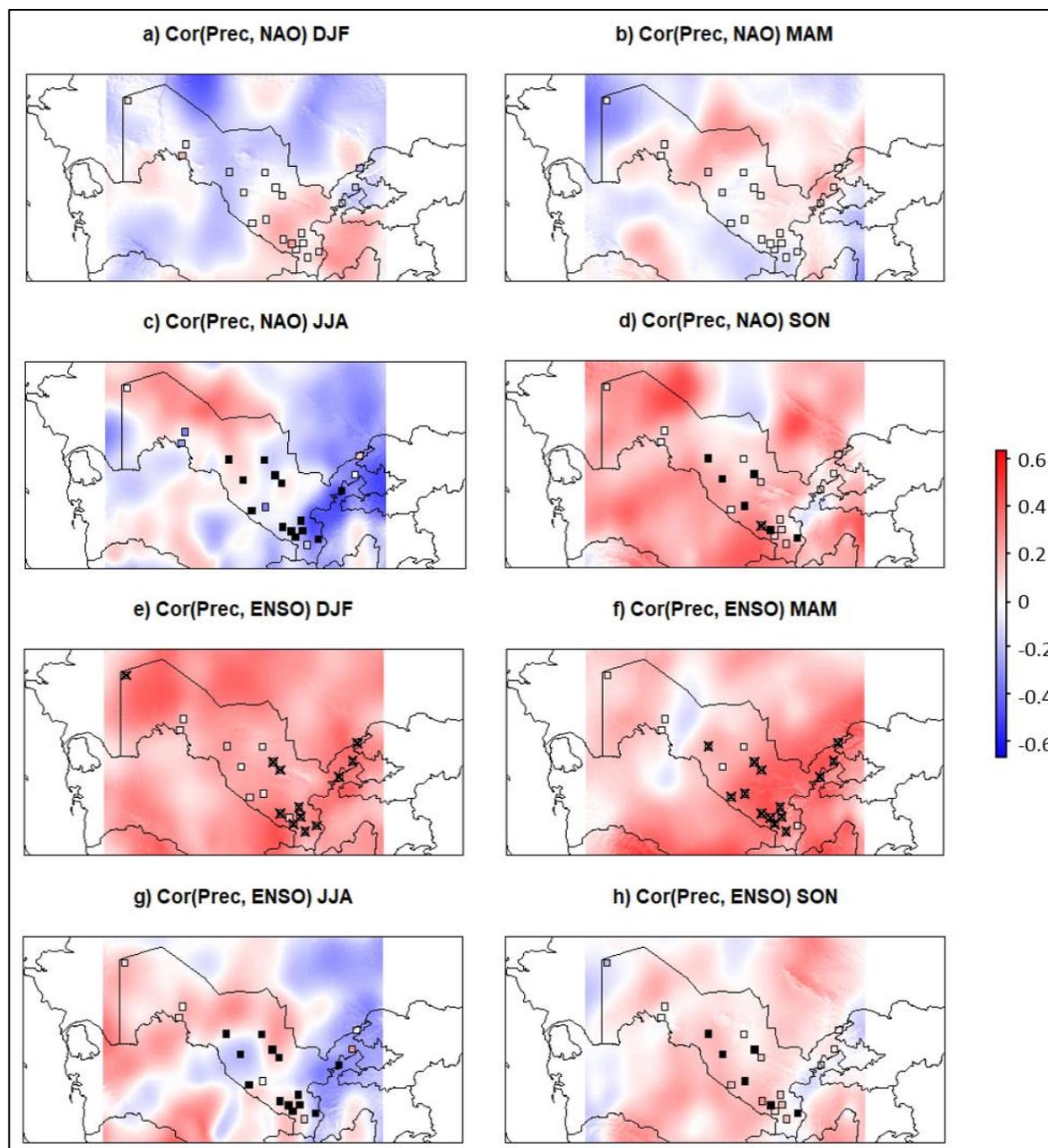


Рисунок 7. Корреляция между сезонными осадками и индексами NAO и ENSO за 1979–2013 гг. Квадраты указывают на корреляцию для наблюдений станции (та же цветовая шкала). Значимые корреляции ($p \leq 0,05$) отмечены (x).

4. Заключение

Анализ показывает, что данные CHELSA согласуются со стационарными наблюдениями за средними сезонными температурами и суммами осадков. Для большинства станций отклонение – ниже $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Только три станции в горных районах показывают большое температурное отклонение. Это указывает на то, что разрешение в

1 км все еще может быть недостаточным для представления больших колебаний температуры и осадков в высокогорных районах. В частности, Тянь-Шаньский и Памирский районы характеризуются крутыми склонами, которые не полностью разрешаются сеточным набором данных и, таким образом, приводят к существенной разнице между высотой CHELSA и станцией. Кроме того, мелкомасштабные особенности рельефа (с протяженностью ниже эффективного разрешения CHELSA) могут влиять на местный климат. Наконец, станционные наблюдения никогда не могут считаться совершенными. В частности, указание местоположения станции (обычно с двумя десятичными числами) может привести к небольшому несоответствию координат станции и CHELSA, что может повлечь значительные различия температур и осадков на сложном рельефе.

Тенденции и корреляции с крупномасштабными климатическими индексами хорошо представлены CHELSA, что указывает на ее потенциал для исследований изменения климата в Узбекистане.

В течение трех сезонов – весной, осенью и летом – наблюдается сильная тенденция потепления. Наибольшие положительные (и весьма значимые) температурные тренды наблюдаются весной, что может привести к сдвигу сезона таяния снега и повышению риска селей в горных районах. Зимой практически отсутствуют статистически значимые тенденции, хотя незначительные отрицательные тенденции отмечаются CHELSA и станционными наблюдениями для северной части страны. Статистически значимые тенденции выпадения осадков выявляются зимой по трем метеостанциям. В остальные сезоны практически нет значимых трендов, за исключением одной станции весной. По этой причине невозможно сделать убедительное заявление относительно изменения количества сезонных осадков.

Согласно результатам корреляционного анализа, связь между индексом Североатлантического колебания и средней температурой воздуха отрицательна практически в течение всего года. Только в зимний сезон положительная связь была выявлена на северо-западе и в центральной части страны. Самая слабая корреляция была обнаружена в осенний сезон, самая сильная – в летний. Существует также отрицательная корреляция между ENSO и температурой воздуха во все сезоны года, за исключением зимы.

Корреляция между климатическими индексами (ENSO, NAO) и осадками в большинстве случаев положительная. Особенно в зимний и весенний сезоны наблюдается сильная положительная связь между ENSO и осадками. Положительные значения ENSO (явления Эль-Ниньо) обычно соответствуют влажному зимнему и весеннему сезону в Узбекистане, что дает возможность для улучшения сезонных прогнозов осадков и водообеспеченности.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что температура воздуха в Узбекистане за период с 1979 по 2013 год характеризуется положительной тенденцией в большинстве сезонов года, что, скорее всего, связано с глобальным потеплением. Напротив, осадки в большинстве случаев не демонстрируют значительных тенденций.

Сильная корреляция с ENSO указывает на то, что режим осадков (пока) существенно не меняется, но в значительной степени зависит от природных явлений в глобальном масштабе.

5. Обсуждение

Положительная оценка набора данных CHELSA дает возможность лучше определить и понять изменения климатических характеристик в Узбекистане. Такие свободно доступные и в пространственном отношении полные наборы данных могут принести большую пользу, особенно для регионов, которые характеризуются дефицитом данных, таких как Центральная Азия. На сегодняшний день исследования воздействия климата часто основаны на незначительном количестве наблюдений, которые, возможно, не являются репрезентативными для всей страны. Небольшое отклонение температуры и осадков, а также точная оценка климатических тенденций на большинстве станций указывают на то, что рассмотрение набора данных CHELSA может улучшить качество и снизить неопределенность исследований воздействия климата (например, в области гидрологии, гляциологии или сельского хозяйства).

Кроме того, точная количественная оценка статистических взаимосвязей между осадками и температурой и крупномасштабными климатическими индексами, такими как Североатлантическое колебание и Южное колебание Эль-Ниньо, показывает, что изменчивость климата в Узбекистане хорошо отражена набором данных CHELSA. В частности, высокие корреляции с ENSO указывают на потенциал сезонных прогнозов осадков в Узбекистане, что может способствовать разработке стратегий устойчивого управления водными ресурсами в стране.

Конечно, набор данных – будь то наблюдательный или моделируемый – никогда не бывает совершенным: как показано, набор данных CHELSA имеет некоторые недостатки в воспроизведении сезонных осадков и температурных значений в сложной местности. Поэтому оценка качества данных должна проводиться в случае наличия каких-либо стационарных наблюдений. Однако в целом авторы могут рекомендовать использование этого набора данных для исследований (например, в области изменения климата, изменчивости климата и сезонного прогнозирования) и в сфере управления водными и земельными ресурсами.

6. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Aleksandrova, M., Gain, A. K., and Giupponi, C., 2016, Assessing agricultural systems vulnerability to climate change to inform adaptation planning: an application in Khorezm, Uzbekistan. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 21, pp. 1263–1287. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9655-y>.
2. Barlow, M., Zaitchik, B., Paz, S., Black, E., Evans, J., and Hoell, A., 2015, A Review of Drought in the Middle East and Southwest Asia. *Journal of Climate*. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00692.1>.
3. Chen, F., Huang, W., Jin, L., Chen, J., and Wang, J., 2011, Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming. *Science China Earth Sciences*, Vol. 54, pp. 1812–1821. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4333-8>.
4. Chub, V. E., 2007, *Climate change and its impact on hydrometeorological processes, agroclimatic and water resources of the Republic of Uzbekistan*. Internal report at UzHydromet.
5. Chub, V., and Spectorman, Y., 2016, *Climate Trends in Uzbekistan: Climate Change, Reasons, Impacts and Response Measures*. UzHydromet Bulletin No. 10, Tashkent.
6. Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. -J., Park, B. -K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. -N., Vitart, F., 2011, The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Meteorological Society*, Vol. 137, pp. 553–597. Available at: <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
7. Gerlitz, L., Vorogushyn, S., Apel, H., Gafurov, A., Unger-Shayesteh, K., and Merz, B., 2016, A statistically based seasonal precipitation forecast model with automatic predictor selection and its application to central and south Asia. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 20, pp. 4605–4623. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-20-4605-2016>.
8. Gerlitz, L., Steirou, E., Schneider, C., Moron, V., Vorogushyn, S., and Merz, B., 2018, Variability of the Cold Season Climate in Central Asia. Part I: Weather Types and Their Tropical and Extratropical Drivers. *Journal of Climate*, Vol. 31, pp. 7185–7207. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0715.1>.
9. Giese, E., Mossig, I., Rybski, D., and Bunde, A., 2007, Long-Term Analysis of Air Temperature Trends in Central Asia (Analyse langjähriger Zeitreihen der Lufttemperatur in Zentralasien). *Erdkunde*, Vol. 61, pp. 186–202. (in German).

10. Hess, A., Iyer, H., and Malm, W., 2001, Linear trend analysis: a comparison of methods. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 5211–5222. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00342-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00342-9).
11. Hurrell, J. W., 1995, Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, Vol. 269, pp. 676–679. Available at: <https://doi.org/10.2307/2888966>.
12. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
13. Karger, D. N., Conrad, O., Böhrer, J., Kawohl, T., Kreft, H., Wilber, R., Zimmermann, N., Linder, H., Kessler, M., 2017, Climatologies at high resolution for the earth’s land surface areas. *Scientific Data*, Vol. 4, Article Nr: 170122. Available at: <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>.
14. Kendall, M. G., 1938, A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika*, Vol. 30, pp. 81–93, Available at: <https://doi.org/10.2307/2332226>.
15. R Development Core Team, 2008, R: The R Project for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing. Available at: <https://www.r-project.org/> (Accessed December 17, 2015).
16. Rasmusson, E. M., and Wallace, J. M., 1983, Meteorological Aspects of the El Niño/Southern Oscillation. *Science*, Vol. 222, pp. 1195–1202. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.222.4629.1195>.
17. Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., and Rudolf, B., 2014, GPCC’s new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 115, pp. 15–40. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>.
18. Siegfried, T., Bernauer, T., Guiennet, R., Sellars, S., Robertson, A. W., Mankin, J., Bauer-Gottwein, P., and Yakovlev, A., 2012, Will climate change exacerbate water stress in Central Asia? *Climatic Change*, Vol. 112, pp. 881–899. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0253-z>.
19. Syed, F. S., Giorgi, F. Pal, J. S., and King, M. P., 2006, Effect of remote forcings on the winter precipitation of central southwest Asia part 1: observations. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 86, pp. 147–160. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0217-1>.
20. Syed, F. S., Giorgi, F., Pal, J. S., King, M.P., and Keay, K., 2010, Regional climate model simulation of winter climate over Central–Southwest Asia, with emphasis on NAO and ENSO effects. *International Journal of Climatology*, Vol. 30, pp. 220–235. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.1887>.

-
21. Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Farinotti, D., Gafurov, A., Duethmann, D., Mandychev, A., and Merz, B., 2013, What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review. *Global and Planetary Change*, Vol. 110, Part A, pp. 4–25. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.004>.
 22. Uzhydromet and UNEP, 2016, *Third National Communication of the Republic of Uzbekistan under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).