



## Типы погоды и их частотность над территорией Центральной Азии: анализ месячной изменчивости и изменения климата в течение бореального холодного сезона года на основе данных ERA-Interim

Себастьян Шмидт\*, Ларс Герлиц

Потсдамский центр имени Гельмгольца, Немецкий исследовательский центр геонаук, Германия

\*для корреспонденции: [s.schmidt.geo@web.de](mailto:s.schmidt.geo@web.de)

IRSTI 37.23.29

doi: 10.29258/CAJWR/2019-R1.v5-2/73-110.rus

Данная версия является переводом статьи « Weather types and their frequencies over Central Asia – an ERA-Interim based analysis of monthly climate variability and change for the boreal cold season», опубликованной в журнале 30 декабря 2020 г.

### Аннотация

Климатические исследования в Центральной Азии, как правило, основываются на анализе данных метеорологических наблюдений. Однако их нехватка для горных районов приводит к ряду неопределенностей, и ввиду этого масштабы изменения климата и его изменчивость в Центральной Азии до сих пор остаются предметом дискуссий. Кроме того, изучение данных наблюдений позволяет оценить лишь климат приземного слоя. Поскольку метеорологические условия в тропосферных слоях в основном неизвестны, атмосферные механизмы, приводящие к наблюдаемым изменениям климата, остаются неизученными. В настоящей статье авторы представляют результаты исследования изменения и изменчивости климата в Центральной Азии на основе ре-анализа данных ERA-Interim – наборов данных с координатной привязкой по различным метеорологическим параметрам для 60 слоев атмосферы. При изучении климатических условий во время бореального холодного сезона объективная классификация типов погоды (weather types, WT) была сопоставлена с данными геопотенциальных высотных (GPH) полей 500 гПа. Полученные результаты указывают на то, что теплые и влажные условия в Центральной Азии могут быть связаны с антициклонической аномалией над Южной Азией или смещением на юг западного струйного течения. Сухие условия сопровождаются циклонической аномалией над Южной Азией. Авторы демонстрируют, что комбинация типов погоды существенно влияет на месячные и сезонные показатели температуры и осадков, а также что преобладающие климатические тренды частично обуславливаются изменением частотности типов погоды. Около 50% сезонного и 60% мартовского температурных трендов могут объясняться изменениями частотности типов погоды. Несмотря на то, что наблюдаемые сезонные тренды выпадения осадков в целом невозможно объяснить изменениями частотности типов погоды, восходящий тренд в течение ноября, как представляется, сопровождается снижением частоты периодов высокого давления над территорией Центральной Азии.

**Ключевые слова:** изменение климата, изменчивость климата, типы погоды, осадки, температура

**Тип работы:** научная статья

## 1. Введение

Центральная Азия, состоящая из пяти бывших советских республик – Казахстана, Кыргызстана, Таджикистана, Туркменистана и Узбекистана, расположена между Каспийским морем на западе, Уральскими горами, а также Россией на севере и высокогорными системами Гиндукуш, Тянь-Шань и Алтай на юге и востоке (De Pauw, 2007; Mirzabaev, 2013). Этот регион характеризуется полузасушливым, засушливым и резко континентальным климатом и представляет собой переходную зону между умеренным и субтропическим климатом (Böhner, 2006; Schiemann et al., 2008; Bothe et al., 2011). Годовые суммы осадков на большей части территории Центральной Азии невелики. Около 90 % региона получает 400 мм или ниже (De Pauw, 2007; Schiemann et al., 2008). Более 50 % годового количества осадков выпадает с ноября по март (холодный сезон) и выпадает в виде снега на Тянь-Шане и Памире (Syed et al., 2006; Barlow and Tippett, 2008; Schiemann et al., 2008; Apel et al., 2018; Gerlitz et al., 2018). Снег и лед в верховьях водосборов имеют важное значение для более чем 70 млн жителей Центральной Азии, поскольку талая вода весной и летом позволяет производить ирригацию и гидроэлектроэнергию в теплое время года (Unger-Shayesteh et al., 2013; World Bank, 2018). Сельское хозяйство является одним из важнейших секторов экономики в Центральной Азии и в значительной степени зависит от оросительной воды. Эти обстоятельства приводят к высокой уязвимости региона по отношению к засухам (Dukhovny, 2010; Unger-Shayesteh et al., 2013). Региональное потепление в Центральной Азии заметно превышает среднемировой уровень, с прогнозируемыми тенденциями до 4,8 °C до конца века (Giorgi, 2006; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014). Прогнозируемые климатические изменения приведут к увеличению потребности в воде для орошения из-за увеличения эвапотранспирации. Кроме того, прогнозируется прогрессирующее таяние ледников и уменьшение снежного покрова в холодных горных районах (Gerlitz et al., 2018, Sommer et al., 2013). Сочетание высокого спроса на воду для сельского хозяйства и высоких темпов потепления, скорее всего, приведет к увеличению связанной с водой уязвимости и рисков. Поэтому глубокое понимание региональной климатической системы и ее изменений имеет важное значение для поддержки устойчивого управления водными ресурсами и защиты населения от связанных с водой рисков (Schiemann et al., 2008; Unger-Shayesteh et al., 2013; Gerlitz et al., 2018).

Для изучения климатических условий и тенденций в Центральной Азии необходимы надежные и достоверные наборы данных. Климатологические записи со станций наблюдения в исследуемом районе скудны и часто демонстрируют неоднородность. Продукты климатического реанализа представляют собой перспективную альтернативную базу данных для региональных климатических исследований, поскольку они обеспечивают пространственно-временную полноту данных. Реанализ ERA-Interim является одним из наиболее широко используемых

продуктов глобального атмосферного реанализа. Набор сеточных данных был положительно оценен для Китая, Центральной и Высокой Азии (Dee et al., 2011; Gerlitz et al., 2014; Bao and Zhang, 2012; Wang and Zeng, 2012).

Климатические реанализы включают большие объемы данных, поскольку они учитывают как приповерхностные климатические характеристики, так и вышележащую атмосферную циркуляцию, и предоставляют поля различных атмосферных переменных, таких как температура, давление, влажность и т. д. Таким образом, для исследования продуктов реанализа требуются программные инструменты и алгоритмы, которые структурируют большие массивы данных и извлекают из них наиболее важные характеристики.

Соответствующими подходами для получения основных атмосферных режимов из продуктов реанализа являются классификации типов погоды (WT). Они позволяют сжать сложные наборы данных до небольшого количества классов, которые четко структурированы и легко интерпретируются. Широко используемым методом классификации является кластерный анализ методом *k*-средних (K-MCA), который позволяет автоматически разделить набор данных на определенное количество групп. Поскольку было показано, что этот традиционный метод классификации непригоден для классификации WT из-за необходимости заранее заданного числа кластеров и зависимости кластерного решения от исходного определения кластерных точек были предложены различные усовершенствования методологии классификации (Michelangeli et al., 1995; Roller et al., 2016). Gerlitz et al. (2018) уже успешно внедрили первую классификацию WT для Центральной Азии на основе улучшенного K-MCA и исследовали взаимосвязь между составом WT и приповерхностным климатом в сезонном масштабе. В представленном последующем исследовании авторы применяют тот же метод классификации WT к полям GPH 500 гПа и уделяют особое внимание исследованию изменчивости и изменения климата в месячном масштабе. Полученные WT позволяют изучить региональную атмосферную циркуляцию над Центральной Азией и исследовать взаимосвязи между WT и приповерхностной температурой и осадками. Таким образом, средние температуры и суммарные осадки реконструируются на основе состава WT и соотносятся с соответствующими наблюдениями. Анализ тенденций наблюдаемых и реконструированных полей температуры и осадков проводится в сезонном и месячном масштабах с целью исследования с более высоким временным разрешением по сравнению с Gerlitz et al. (2018). Климатические тренды рассчитываются по сетке и территориально усредняются для каждой центральноазиатской страны, с целью оценки влияния изменения климата в национальном масштабе и поддержки политических решений.

Цель представленного исследования двоякая: (1) авторы представляют данные климатического реанализа как перспективного источника для изучения региональной изменчивости и изменения климата в Центральной Азии и рекомендуют использовать данные реанализа в области прикладной климатологии с целью снижения неопределенности оценок изменения климата; (2) исследование развивает изыскания

Gerlitz et al. (2018), сфокусировавшись на анализе ежемесячной изменчивости климата в течение бореального холодного сезона. Ежемесячные тренды температуры и осадков получены из наблюдаемых и реконструированных наборов данных и сопоставлены с изменениями частоты WT с целью изучения соотношения изменчивости и изменения климата, которое может быть объяснено тенденциями возникновения WT.

В разделе 2 представлен обзор топографических характеристик и климатических условий Центральной Азии. Краткое описание данных WT реанализа ERA-Interim и предварительной обработки данных приведено в разделе 3.1. Алгоритм классификации К-МСА и методы анализа типов погоды и реконструкции полей температуры и осадков описаны в разделе 3.2 и 3.3. В разделе 4 обобщены временные и пространственные характеристики WT, а также влияние состава WT на аномалии температуры и осадков. В разделе 5 обсуждаются соответствующие результаты.

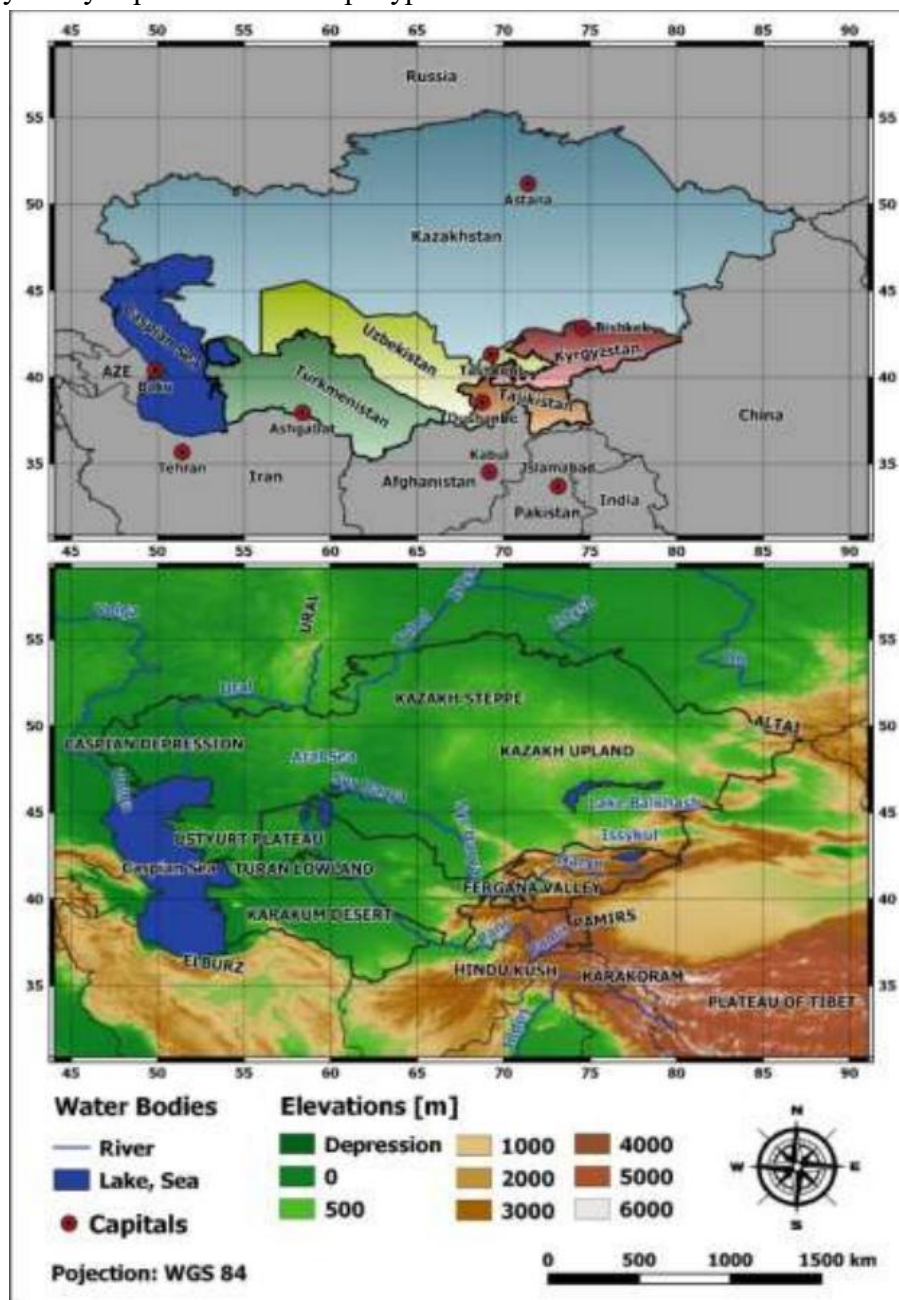
## 2. Область исследования и данные

В качестве района исследования выбрана территория от 20° до 60° северной широты и от 50° до 90° восточной долготы. В политическом отношении Центральная Азия представлена пятью бывшими советскими республиками, это Казахстан, Кыргызстан, Таджикистан, Туркменистан и Узбекистан (рис. 1, верхняя панель), и занимает площадь около 4 млн км<sup>2</sup>, что составляет 10 % азиатского континента (Dukhovny and de Schutter, 2011). Ландшафт Центральной Азии состоит из обширных равнин с высотами ниже 500 м. На востоке исследуемый регион граничит с горными районами Алтая, Тянь-Шаня, Памира и Гиндукуша. Высота гор Центральной Азии превышает 5000 м, а некоторые вершины превышают 7000 м (De Pauw, 2007).

В целом сезонная температура воздуха снижается от юго-западной к северо-восточной и восточной части Центральной Азии (рис. 2, верхняя панель) по следующим причинам: интенсивность солнечного излучения понижается от более низких к более высоким широтам, а высота над уровнем моря увеличивается от Туранской равнины до гор Алтая в восточной части Центральной Азии и до гор Гиндукуша, Памира и Тянь-Шаня в юго-восточной части исследуемой территории. В большинстве районов Казахстана, Узбекистана и Туркменистана, а также в восточной части Кыргызстана выпадает очень малое количество сезонных осадков – менее 110 мм (рис. 2, нижняя панель). В частности, очень сухие условия наблюдаются над Туркменистаном и Юго-Западным Казахстаном. Более высокие сезонные суммарные показатели со значениями от 350 до 650 мм наблюдаются на западных склонах гор Гиндукуш, Памир и Тянь-Шань, которые подвержены воздействию влажных западных ветров.

Годовой цикл осадков и температуры в основном зависит от положения и интенсивности западного струйного течения над Центральной Азией (например, Chanysheva et al., 1995; Vothe et al., 2011). Вследствие интенсивного нагрева поверхностей летом образуются сильные тепловые минимумы, поэтому вся исследуемая область характеризуется сухими условиями. Осенью западное струйное

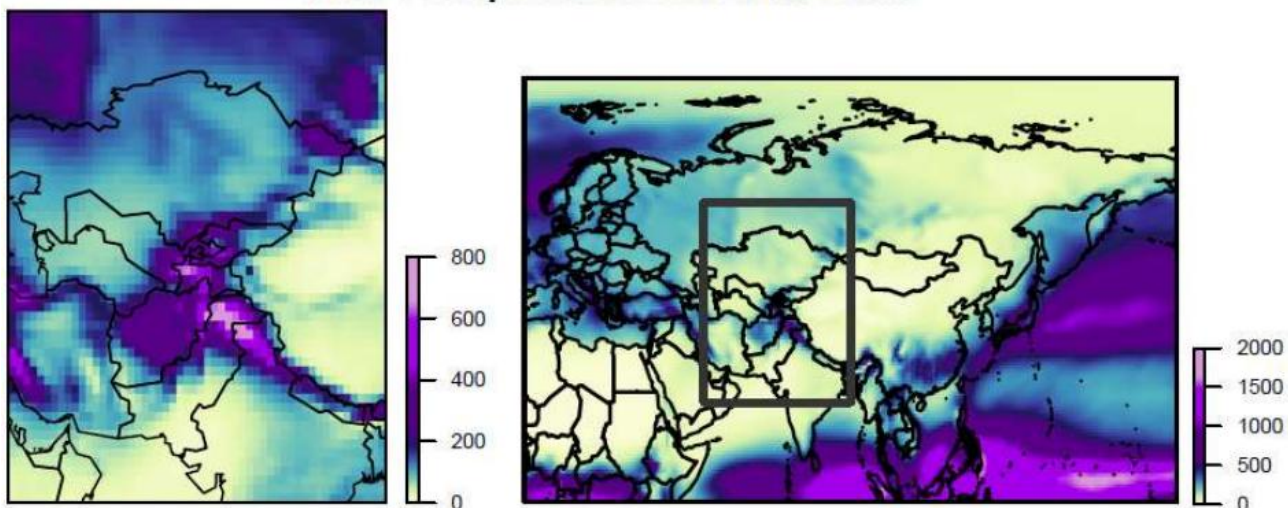
течение постепенно мигрирует на юг и переносит влажные воздушные массы из Средиземного и Аравийского моря в данный район. Зимой струйное течение перемещается дальше на юг и теперь располагается над Ираном и Пакистаном. В северной части Центральной Азии преобладает Сибирский максимум (Азиатский антициклон), что приводит к сухим и холодным условиям, тогда как южная половина характеризуется умеренными температурами и более высоким количеством осадков.



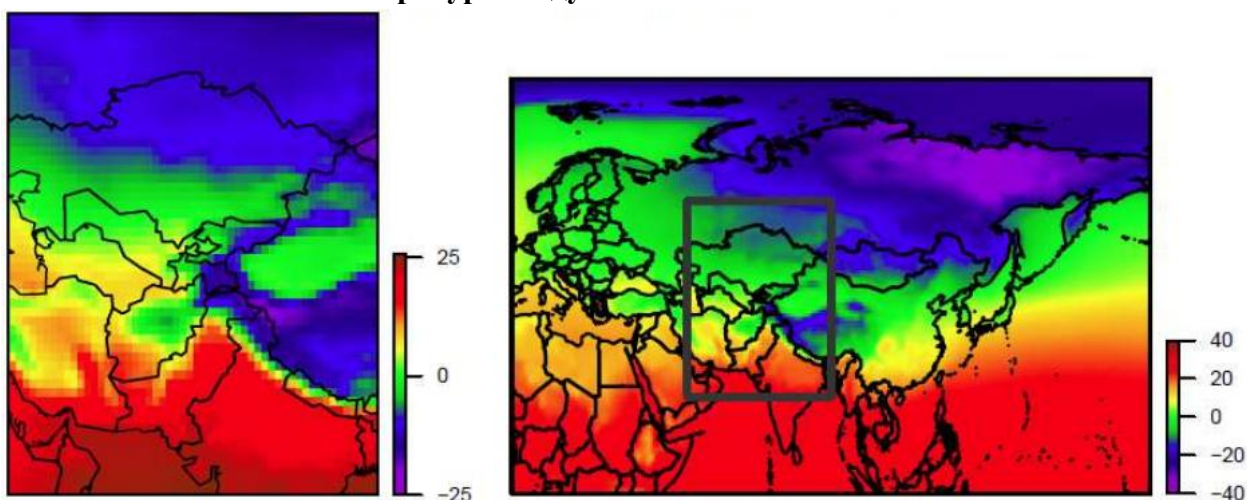
**Рис. 1.** Верхняя панель: политическая карта Центральной Азии. Нижняя панель: физическая карта Центральной Азии. Данные о городах, странах и природных объектах получены из Natural Earth (2019). Высота основана на SRTM 30 м (SRTM, 2019). Карты созданы с помощью геоинформационной системы и открытым исходным

кодом (QGIS, 2019).

### Общее количество осадков: сезонные суммы



### Температура воздуха: сезонные значения



**Рис. 2.** Пространственное распределение сезонных средних значений температуры воздуха – 2 м (°C), верхняя панель) и сезонных сумм осадков (мм), нижняя панель) над Центральной Азией (слева) и Евразией (справа) для бореального холодного сезона с 1979 по 2016 г., полученное на основе данных реанализа ERA-Interim.

Mariotti (2007), Trigo et al. (2010), Dimri (2013) и Gerlitz et al. (2018) отмечают, что на температуру и осадки влияет тропический приток в Центральную Азию, который связан с Южным колебанием Эль-Ниньо (ENSO). Во время теплой фазы Эль-Ниньо юго-западные ветры переносят тепло и влажные воздушные массы в целевую область, что вызвано положительными аномалиями давления и температуры поверхности моря (SST) над западной частью Индийского океана. Холодная фаза Эль-Ниньо (Ла-Нинья) сопровождается антициклонической аномалией над Центральной Азией и северо-

восточными ветрами, которые переносят сухие воздушные массы в целевую область. О связи между сильными засухами в Центральной Азии, например, в 1989, 1999–2001 и 2008 годах, и холодными фазами Эль-Ниньо упоминается в работах Barlow et al. (2002; 2016), Hoell et al. (2014) и Gerlitz et al. (2016; 2018). Barlow et al. (2002) обнаружили взаимосвязь между периодом засухами с 1998 по 2001 год в Центральной Азии и условиями Ла-Нинья, а также очень высокими SST в западной части Тихого океана. Gerlitz et al. (2018) показывают, что влияние ENSO на климат Центральной Азии гораздо более устойчиво, чем вклад Северного полушария.

Кроме тропического ENSO, было обнаружено, что состояние западной циркуляции оказывает влияние на зимний климат Центральной Азии. Syed et al. (2006; 2010) наглядно демонстрируют, что положительные аномалии осадков над Центральной и Юго-Западной Азией связаны с положительной фазой Североатлантического колебания (NAO) и теплой фазой Эль-Ниньо. Эти события связаны с интенсификацией впадины Россби над Центральной и Юго-Западной Азией. Ла-Нинья и отрицательные фазы NAO сопровождаются отрицательными аномалиями зимних осадков. Barlow and Hoell (2015) отмечают, что засуха в период с ноября 2013 по апрель 2014 года на Ближнем Востоке и в Юго-Западной Азии связана с положительной фазой NAO, холодными центрально-тихоокеанскими и теплыми западно-тихоокеанскими SST.

Связь между увеличением поступления влаги в западные районы Центральной Азии и положительным проявлением паттерна Восточная Атлантика/Западная Россия (EA/WR), а также Полярно-Евразийская модели подчеркивается в работе Yin et al. (2014). Аналогичные связи описаны Gerlitz et al. (2018). Положительные фазы Арктической осцилляции (АО) и паттерна EA/WR связаны с усилением адвекции холодных и влажных воздушных масс в район исследования. Противоположный режим паттерна EA/WR приводит к отрицательным аномалиям осадков над целевой областью из-за смещения западного струйного течения к северу. Gerlitz et al. (2018) далее выявили связь между отрицательными аномалиями температуры над Центральной Азией и положительным состоянием скандинавского паттерна, связанного с северным переносом холодных полярных воздушных масс.

### **3. Методология**

#### *3.1. Данные и их предварительная обработка*

Продукт реанализа ERA-Interim используется для исследования атмосферных и приповерхностных климатических условий. ERA-Interim предоставляется Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF, 2016) и является одним из наиболее широко используемых продуктов глобального атмосферного реанализа (Dee et al., 2011). Он находится в свободном доступе на сайте: <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>. Каждый набор данных получен в виде растрового слоя и имеет спектральное разрешение около 80 км (или 0,75° в

направлениях  $x$  и  $y$ ). Поля GPH 500 гПа с временным разрешением 6 часов служат основой для получения WT. WT анализируются с учетом их пространственно-временных характеристик приземной температуры, осадков, скорости и направления ветра на уровне 500 гПа. В то время как области температуры воздуха и ветра составляют 6-часовые средние значения, значения осадков суммируются до 12-часовых суммарных показателей. Для применения усовершенствованного К-МСА в соответствии с Michelangeli et al. (1995) и скорректированного Roller et al. (2016) для классификации WT (см. раздел 3.2) все сеточные данные подготавливаются в несколько этапов. Сначала растровые слои разбиваются в масштабе Центральной Азии и усредняются до среднесуточных значений (высоты GPH, температуры 2 м и компоненты ветра) или суточных сумм (суммарные осадки).

Классификация применяется к стандартизированным полям GPH. Сезонность сохраняется в наборе данных для изучения сезонного цикла и внутрисезонной изменчивости атмосферных условий над Центральной Азией (Gerlitz et al., 2018). Ежедневные поля GPH стандартизируются по сетке путем вычитания среднего значения из значений GPH и деления результатов на стандартное отклонение. С целью изучения влияния WT на приповерхностные климатические аномалии аналогичным образом преобразуются стандартизированные компоненты температуры и ветра. Области осадков преобразуются немного по-другому, так как значения сильно искажены. Аномалии рассчитываются по сетке в процентах путем вычитания из значений общего среднего и деления результатов на общее среднее.

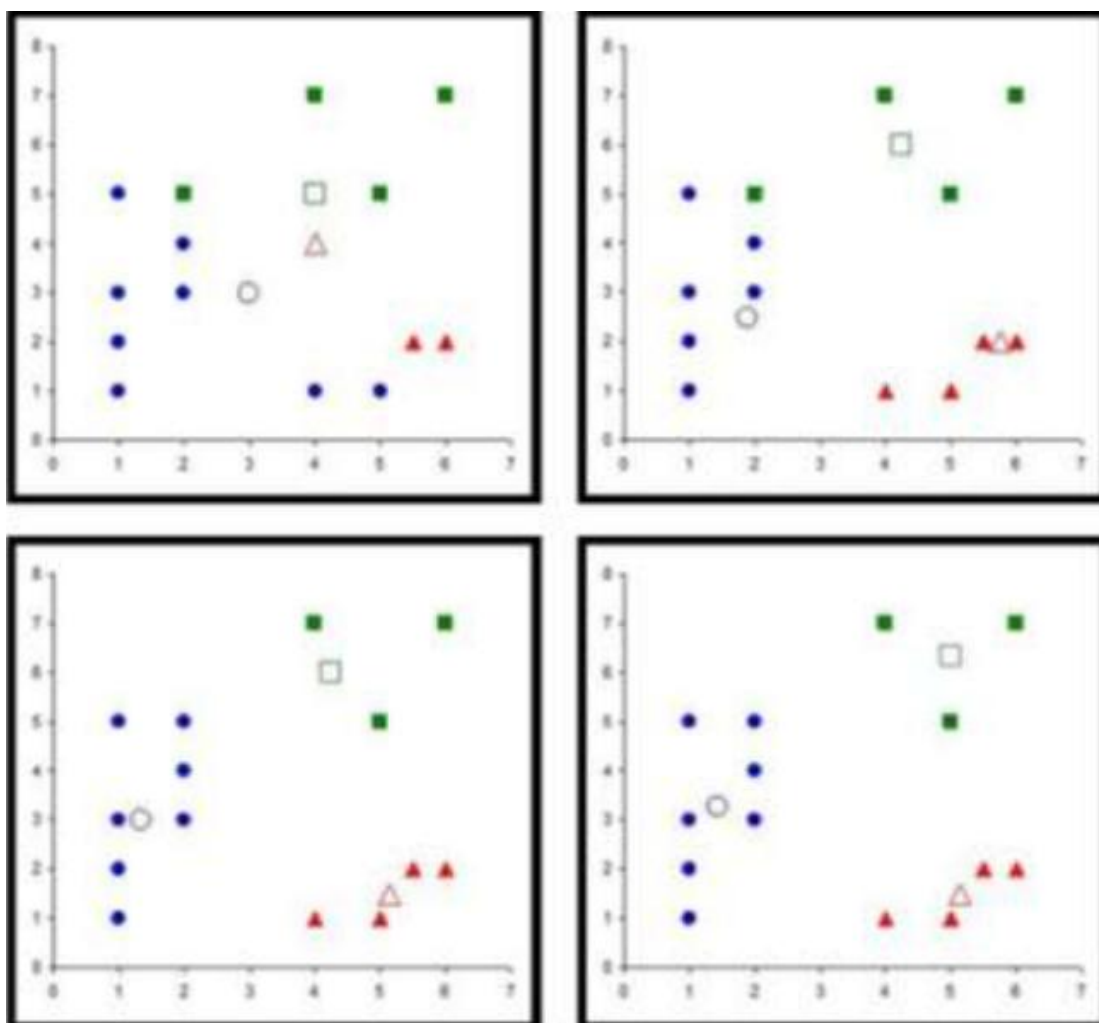
### 3.2. Подход к классификации WT

Классификации широко используются в климатических исследованиях, поскольку они позволяют группировать сложные наборы данных в относительно небольшое число дискретных моделей. Результаты четко структурированы, что позволяет проще интерпретировать соответствующие выводы (Huth et al., 2008; Jacobeit, 2010; Käsmacher and Schneider, 2011).

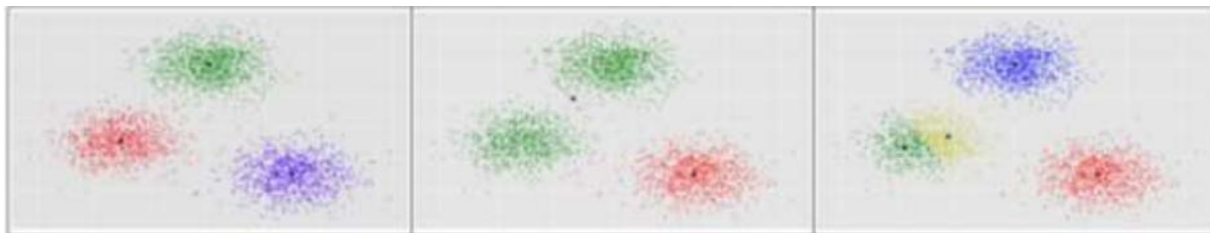
Цель кластеризации К-МСА состоит в том, чтобы сгруппировать набор данных в  $k$ -кластеры, при этом все объекты со сходными статистическими характеристиками выделяются в одну группу, а оставшиеся данные, которые имеют большое статистическое несходство с этой группой, исключаются и относятся к одной из других групп. Для достижения этих целей алгоритм  $k$ -средних осуществляет три основных этапа. На первом этапе в качестве начальных центроидов случайным образом выбираются  $k$  различных точек. На втором этапе все объекты набора данных присваиваются ближайшим центроидам и создаются новые кластеры (рис. 3, вверху слева). На третьем этапе центроиды пересчитываются на основе текущих кластеров (рис. 3, вверху справа). Второй и третий шаги повторяются (рис. 3, внизу слева) до тех пор, пока центроиды не перестанут меняться (рис. 3, внизу справа). В конце алгоритма каждый кластер характеризуется максимальной внутренней однородностью при максимальном несходстве с другими группами (Forgy, 1965; MacQueen, 1967; Lloyd,



1982). Однако результат разбиения чувствителен к количеству кластеров (рис. 4), которое должно быть predeterminedено в классических подходах кластеризации (например, Forgy, 1965; Mac-Queen, 1967; Lloyd, 1982), и случайному выбору центроидов в начале алгоритма (Huth et al., 2008; Jacobeit, 2010). Если выбрано неподходящее число  $k$  или центроиды плохо распределены, то К-МСА может привести к решению, которое не представляет собой наилучшее разбиение набора данных (Bradley et al., 1998; Gerlitz et al., 2018).



**Рис. 3.** Процесс кластеризации  $k$ -средних. Слева вверху: выбор количества кластеров (шаг 1) и отнесение каждой точки к ближайшему центроиду (шаг 2). Справа вверху и слева внизу: пересчет центроидов (шаг 3). Повтор шагов 2 и 3. Внизу справа: до тех пор пока центроиды не перестанут меняться (TUM, 2018).



**Рис. 4.** Пример чувствительности результатов к заранее определенному количеству кластеров. Слева: правильное количество кластеров позволяет выявить естественные кластеры. В центре и справа: выбор слишком низкого (слева) или высокого (справа) числа кластеров приводит к неподходящему разбиению (изменено после TUM, 2018).

Во избежание этих недостатков в классификации типов погоды Michelangeli et al. (1995) и Roller et al. (2016) были предложены некоторые улучшения подхода К-МСА: на первом этапе обработки применяется S-режим PCA для уменьшения размера данных и удаления коллинеарности из набора данных (Huth et al., 2008). Кроме того, этот метод фильтрует локальные флуктуации GPH, например, ячейки низкого давления (Gerlitz et al., 2018). Редукция данных осуществляется с помощью метода эмпирической ортогональной функции (EOF). Этот метод используется для извлечения из высокоразмерного набора данных лишь нескольких переменных (главных компонент), которые объясняют большую часть дисперсии (Rasmusson et al., 1981; Cahalan, 1983; Maćkiewicz and Ratajczak, 1993; Gerlitz et al., 2018). В настоящем исследовании исходными данными для классификации служат 9 основных компонент (95 % от общей дисперсии). Динамический кластерный алгоритм k-средних служит основой для улучшенного К-МСА. Оптимальное количество кластеров определяется автоматически путем повторного разделения 9 PC и виртуальных наборов данных. Для каждого k набор данных разбивается на k кластеры, а затем оценивается надежность результатов кластеризации. Сначала вычисляется 100 кластерных разделений для k = от 2 до 20, при этом каждое разбиение вычисляется с 1000 итерациями. Затем вычисляется коэффициент корреляции аномалий (ACC) для каждой кластерной комбинации из двух секций с одинаковым количеством кластеров. ACC описывает степень корреляции между паттернами. Он варьируется от -1 (полностью разные распределения) до 1 (идентичные паттерны). Все значения ACC вычисляются для каждой реализации с k классами и усредняются до показателя ACC. Кластерное решение с наибольшим значением ACC, представляет собой наилучшее разбиение данных на k классы (подробнее см. Gerlitz et al., 2018).

С целью определения оптимального числа k индекс классифицируемости (CI) определяется как среднее значение баллов ACC для каждого k. Значение CI, равное 1, указывает на то, что все 100 кластерных решений полностью идентичны и набор данных хорошо классифицируется по k классам. Низкие значения CI указывают на то, что кластерные решения различаются в зависимости от случайного распределения

точек. Чтобы оценить значимость CI, значения CI также выводятся из 100 наборов данных красного шума с использованием идентичных процессов. Данные красного шума имеют точно такие же статистические свойства, как и 9 PC (стандартное отклонение, среднее значение и автокорреляция с запаздыванием -1 (день)). На основе значений CI данных красного шума для каждого  $k$  вычисляется двусторонний 5–95%-ный доверительный интервал. Если значение CI, полученное из PC, превышает верхнюю границу доверительного интервала для конкретного числа  $k$ , то предполагается, что классифицируемость атмосферных данных значительно выше, чем классифицируемость синтетических записей. Большие числа  $k$  обычно показывают более высокие значения CI, но создают кластеры с низкими внешними отличиями. Таким образом, оптимальное число кластеров определяется как наименьшее  $k$ , при котором значение CI выше, чем верхняя граница доверительного интервала (Michelangeli et al., 1995; Roller et al., 2016; Gerlitz et al., 2018).

### *3.3. Анализ характеристик WT*

Для изучения влияния WT на приповерхностные условия над Центральной Азией и атмосферную циркуляцию над Евразией для каждого WT усредняются поля GPH, области температуры воздуха на высоте 2 м, осадков и ветра. Компоненты ветра  $U$  и  $v$  объединяются в ветровые поля, содержащие направление и скорость ветра.

С целью анализа влияния состава WT на приповерхностные климатические аномалии, сезонные и месячные оценки температуры и осадков (далее реконструкции) выводятся из WT и частот их встречаемости. Этот подход основан на предположении, что пространственное проявление данных о суточной температуре и осадках для каждого WT остается стабильным в течение всего периода исследования. Реконструкции рассчитываются по сетке путем умножения сезонных или месячных частот каждого WT с соответствующими средними значениями температуры или суммарными осадками. Частичные результаты затем суммируются до месячных или сезонных значений. Реконструированные и наблюдаемые сезонные и месячные паттерны температуры и осадков затем коррелируются для количественной оценки способности классификации WT воспроизводить изменчивость приповерхностного климата над Центральной Азией. Тренды выводятся из наблюдаемых и реконструированных полей температуры и осадков, а также для частот WT на основе метода оценки наклона Сена за период с 1979 по 2016 год. Для корреляционного и трендового анализа в данном исследовании выбран уровень значимости 0,1.

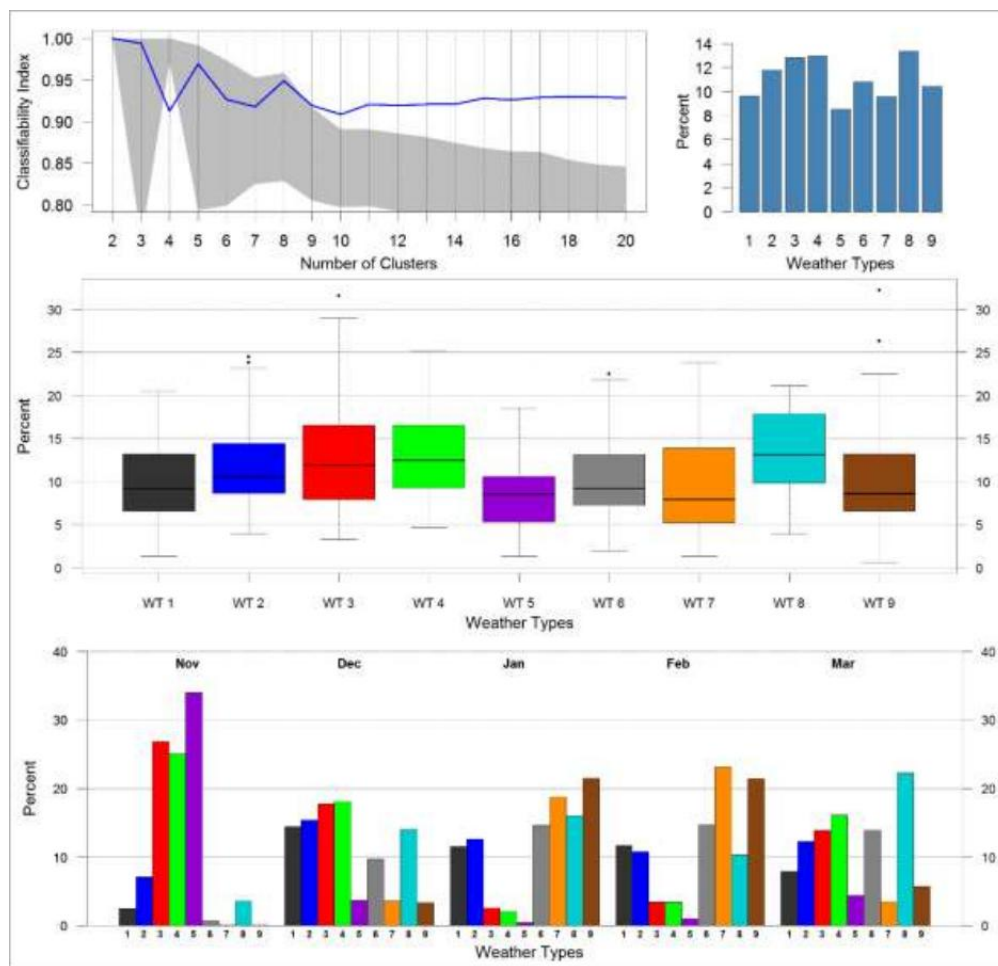
## **4. Результаты**

### *4.1. Временные и пространственные характеристики WT*

Сравнение доверительного интервала CI синтетических данных со значениями CI реальных данных GPH для  $k$ , варьирующихся от 2 до 20 (рис. 5, слева вверху), показывает, что  $k = 9$  представляет собой оптимальное число кластеров. Относительные

частоты WT схожи в сезонном масштабе и варьируются от 8,5 % для WT5 до 13,3 % для WT8 (рис. 5, справа вверху). В месячном масштабе частоты WT сильно различаются (рис. 5, средняя панель). Самые низкие месячные частоты ниже 5 %, самые высокие частоты превышают 20 % для каждого WT. Основные характеристики WT (GPH, поля температуры и осадков) показаны на рисунках 6–8. Результаты означают, что месячные частоты WT отражают сезонный цикл инсоляции. WT9 ясно отображают влияние западных ветров и тропической циркуляции на приповерхностный климат.

В частности, теплые паттерны (WT3–WT5) связаны с высоким GPH и аномалиями антициклонической циркуляции над Южной Азией. Это приводит к юго-западным ветрам (рис. 6 и 7), которые переносят теплые тропические воздушные массы из Красного и Аравийского морей в целевую область. WT5 демонстрирует на сегодняшний день самые высокие положительные аномалии температуры воздуха и GPH и сопровождается наиболее выраженной антициклонической аномалией, которая простирается почти над всей территорией Евразии. Напротив, WT9 и WT7 связаны с сильнейшими отрицательными аномалиями температуры и характеризуются северо-западными ветрами над Казахстаном и Узбекистаном, которые адвектируют полярные воздушные массы в исследуемый район. Сильная циклоническая аномалия над Южной Азией заметно ослабляет тропический приток. Эта совокупность приводит к отрицательным аномалиям температуры над целевой областью. WT6 представляет собой ослабленную вариацию WT9 с нейтральными и умеренно отрицательными аномалиями температуры воздуха. Антициклоническая аномалия над Россией смещена на юг, а циклоническая аномалия над Южной Азией менее выражена.



**Рис. 5.** Вверху слева: индекс классифицируемости (CI) для 2–20 номеров кластеров (синяя линия) и 90%-ный доверительный интервал, основанный на значениях CI для 100 наборов данных красного шума (серое затенение). Вверху справа: относительные частоты итоговых WT9 для всего бореального холодного сезона с 1979 по 2016 год. Средняя панель: диаграммы размаха относительных частот. Нижняя панель: относительные частоты итоговых WT9 для каждого месяца.

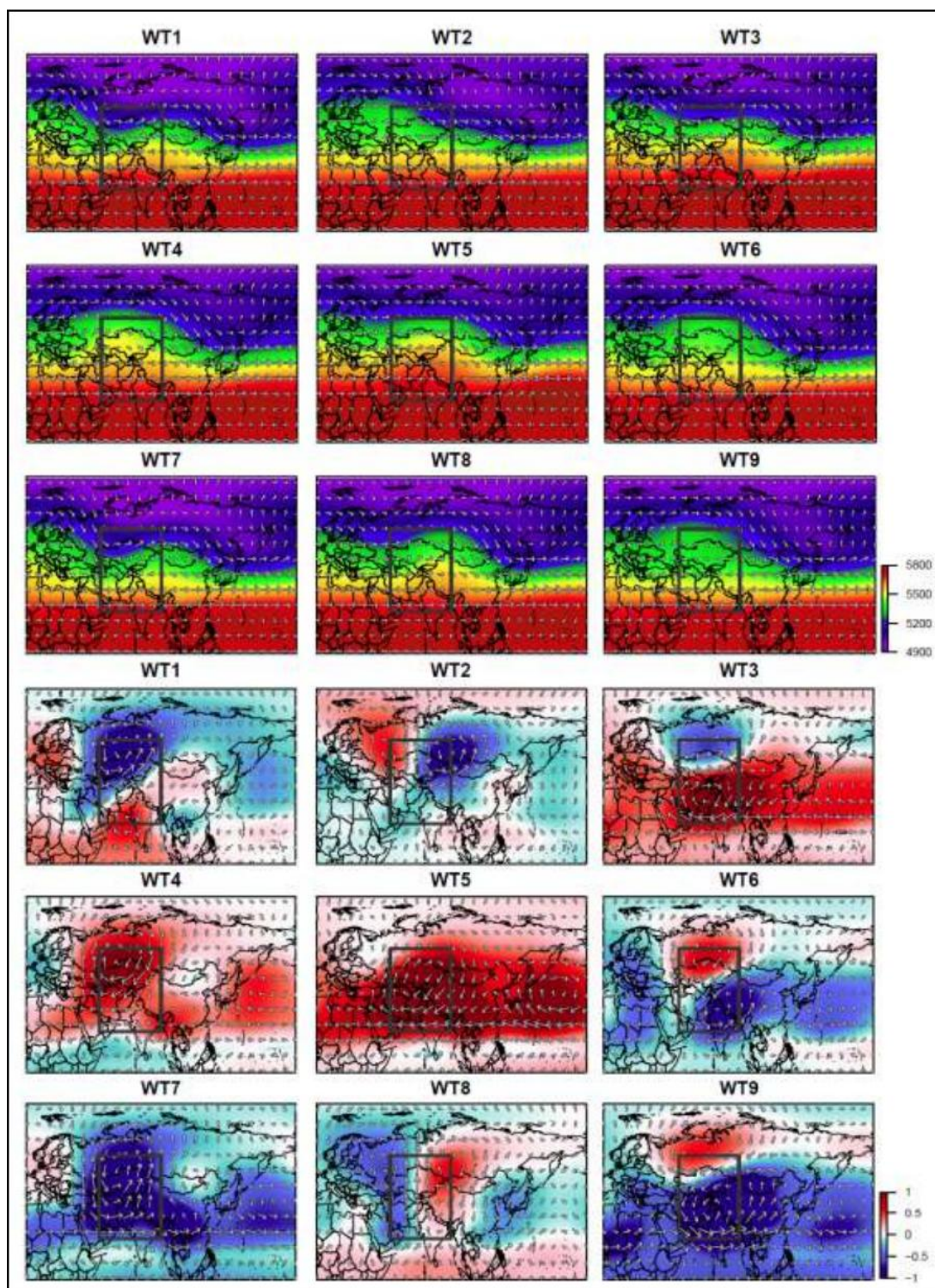
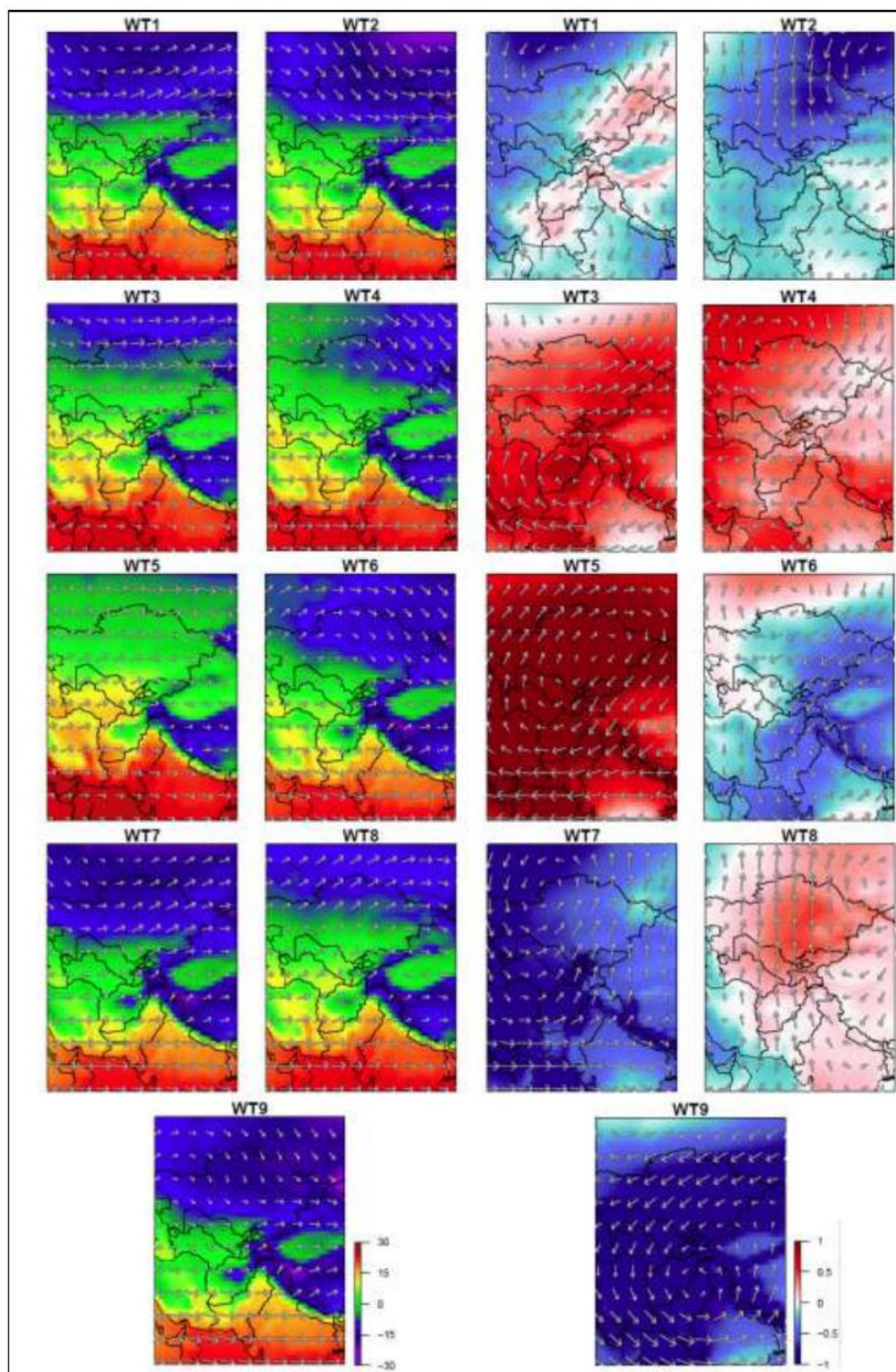
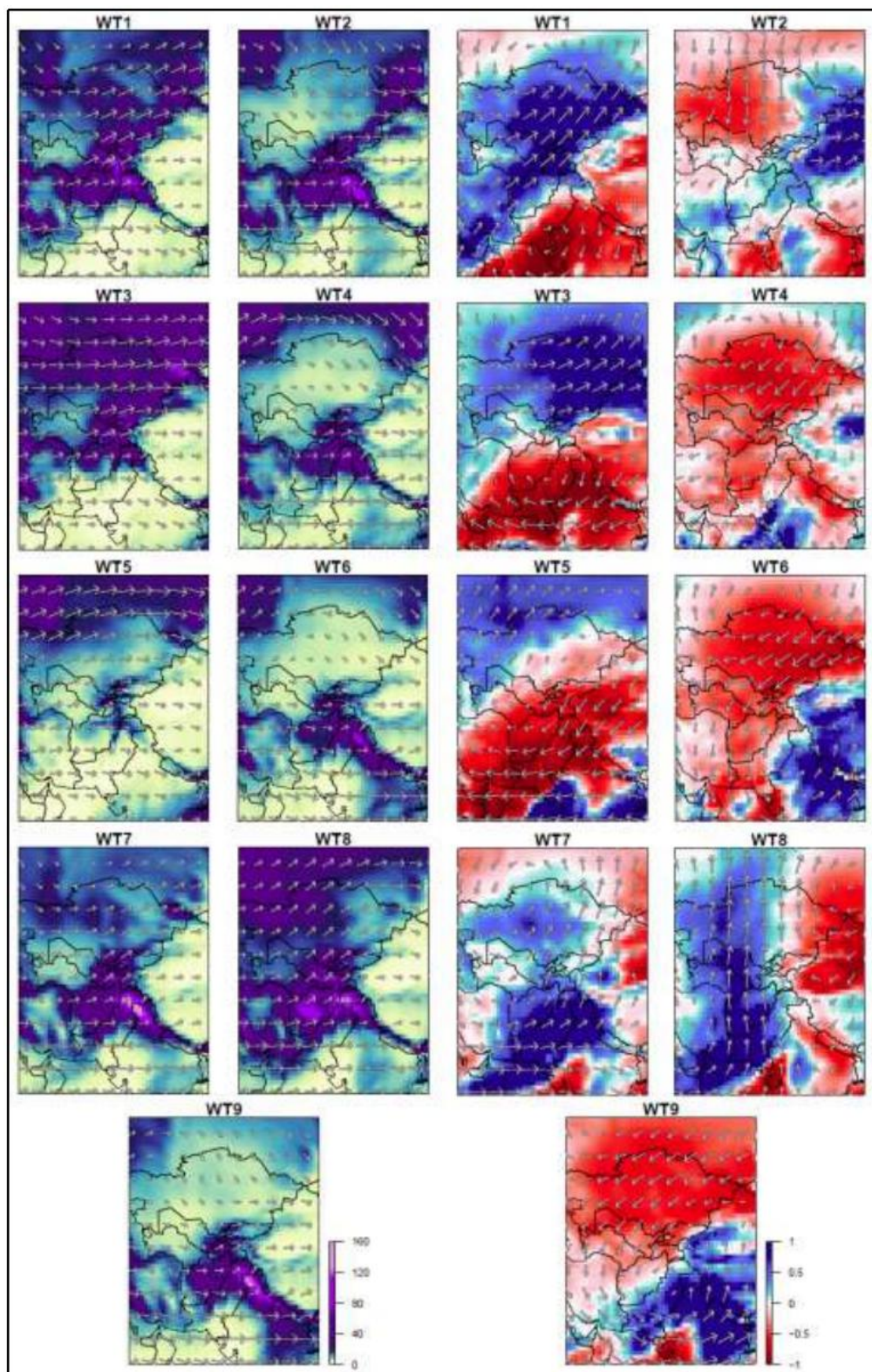


Рис. 6.

Первые три ряда: суточные поля ERA-Interim 500 гПа GPH [м] над Евразией для каждого WT и связанные с ними ветровые поля мощностью 500 гПа (стрелки).  
 Последние три ряда: соответствующие стандартизированные аномалии GPH и ветра.  
 Серый прямоугольник демонстрирует область исследования – Центральную Азию, которая используется для классификации WT.



**Рис. 7.** Левая половина: суточные ERA-Interim температуры воздуха - 2 м [°C] над Центральной Азией для каждого WT и связанные с ним ветровые поля 500 гПа (стрелки); правая половина: соответствующие стандартизированные 2 м температуры воздуха и аномалии ветра для каждого WT.



**Рис. 8.** Левая половина: суточные суммы осадков [мм] ERA-Interim над Центральной Азией для каждого WT и связанные с ними ветровые поля 500 гПа (стрелки). Правая половина: соответствующие аномалии осадков [%/100] и ветра.



WT1 показывает переходное состояние между очень холодными и более теплыми условиями. Западное струйное течение смещается на юг, а северо-западные ветры переносят полярные воздушные массы в западные и юго-западные районы Центральной Азии. Одновременно над Южной Азией наблюдается ярко выраженная антициклоническая аномалия, приводящая к юго-западному притоку тропических воздушных масс на восток Центральной Азии. Это приводит к слабым положительным температурным аномалиям над горами Гиндукуш, Тянь-Шань и Алтай. WT8 характеризуется незначительными положительными аномалиями температуры воздуха. Паттерн характеризуется циклонической аномалией над Европой и Западной Азией и антициклонической аномалией над восточной частью Центральной Азии и восточной частью России. Это приводит к меридиональным ветрам северного направления, которые перемещают теплые тропические воздушные массы. WT2 имеет обратные условия циркуляции. Аномалия меридионального ветра южного направления над Центральной Азией переносит полярные воздушные массы на всю исследуемую территорию, что приводит к отрицательным аномалиям температуры.

Смещение западного струйного течения на юг приводит к северо-западному притоку влажных воздушных масс, особенно на восточной стороне впадины Россби (рис. 6, верхняя панель). Кроме того, юго-западный поток тропических воздушных масс с Каспийского моря, Красного моря и Персидского залива приводит к усиленному поступлению влаги, если антициклоническая аномалия находится над Южной Азией. Паттерны WT1 и WT3 характеризуются как смещением западной струи на юг, так и антициклонической аномалией над Южной Азией. В результате они характеризуются наибольшими положительными аномалиями осадков (рис. 8, правая панель). Также WT7 связан с впадиной Россби над Центральной Азией, но обширная циклоническая аномалия над Евразией и Южной Азией приводит к уменьшению поступления тропической влаги, что приводит к немного уменьшенным, но все же сильно положительным аномалиям осадков.

Очень сухие условия связаны с аномалией антициклонической циркуляции над Центральной Россией и северной частью Центральной Азии и циклонической аномалией над Южной Азией. Это сочетание приводит к смещению струйного потока на север, ослаблению переноса влажных воздушных масс в целевую область и, следовательно, к меньшему количеству осадков (WT4, WT6 и WT9). Аналогичным образом WT5 имеет циклоническую аномалию над Южной Азией, но западный поток расположен над Северным Казахстаном, что приводит к незначительным положительным аномалиям осадков на севере целевой области, в то время как юг характеризуется сухими условиями.

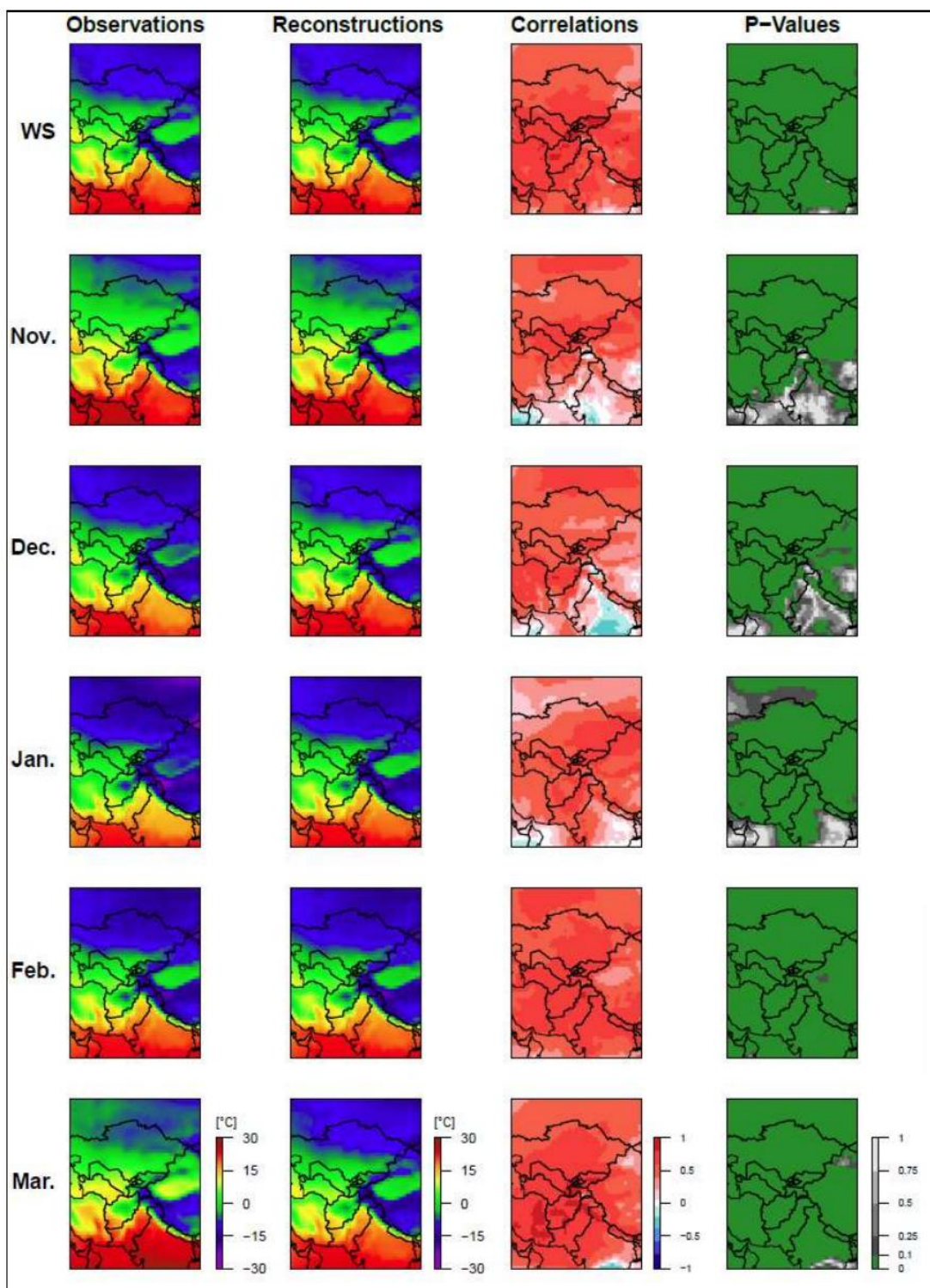
Зональное смещение западного струйного течения с впадиной Россби над западной частью Центральной Азии и гребнем Россби над Монголией в WT8 приводит к усиленному поступлению влаги из Персидского залива и, следовательно, к положительным аномалиям осадков над Западным Казахстаном, Узбекистаном и Туркменистаном. Особенности WT2 в обратной циркуляции и характере осадков.

#### *4.2. Оценка реконструкций температуры и осадков на основе WT*

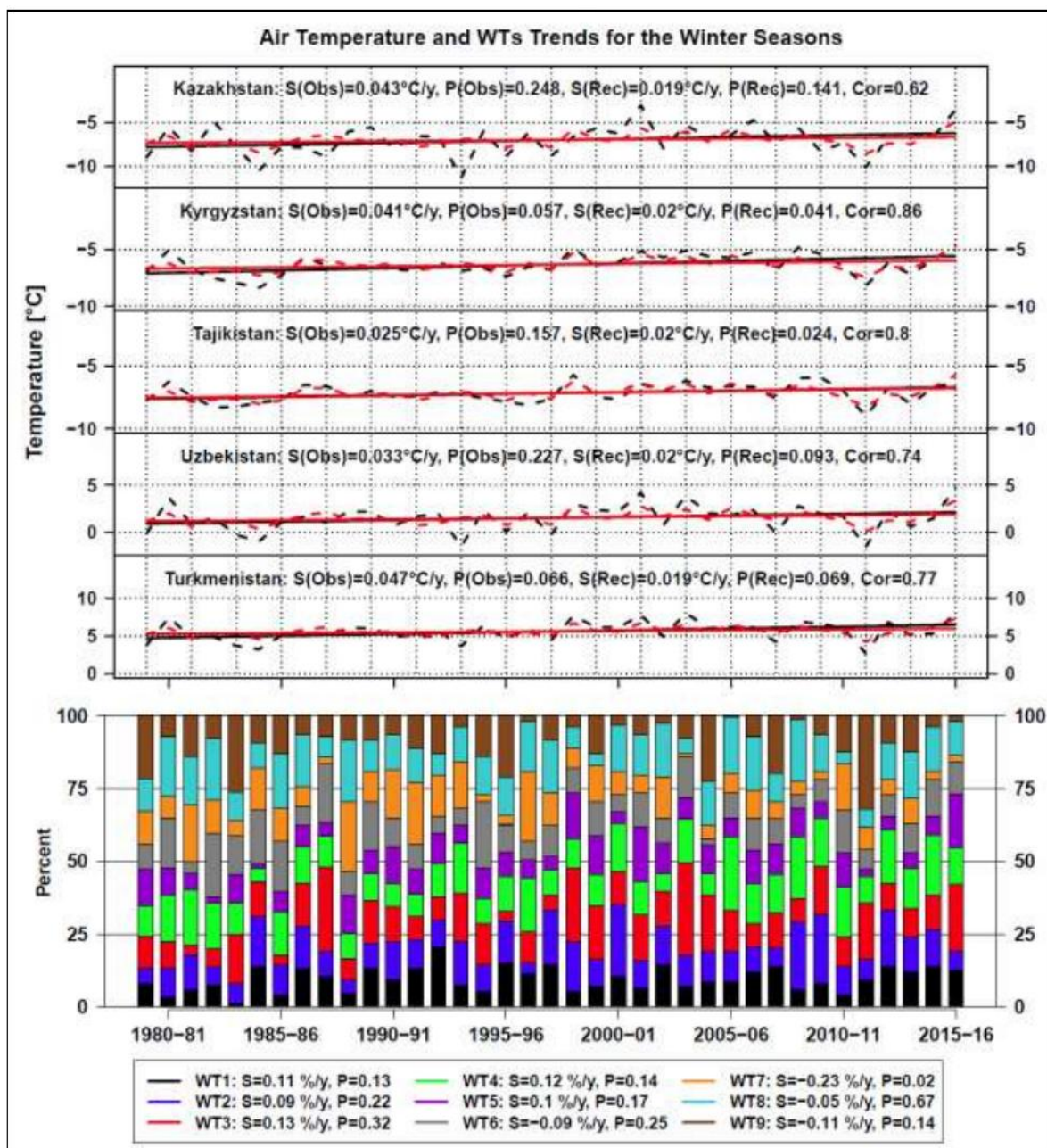
Сезонные и месячные корреляции между наблюдаемыми и реконструированными на основе WT температурами воздуха в основном превышают 0,4 и статистически значимы на всей исследуемой территории (рис. 9, правые колонки и таблица I). Высокие корреляции указывают на то, что сезонная и месячная изменчивость температуры сильно зависит от состава WT. Это показывает, что учет оценок состояния верхней тропосферы, основанных на данных реанализа, дает важную информацию для интерпретации наблюдаемой изменчивости и изменений климата.

Практически отсутствуют различия между средними реконструкциями и наблюдениями в сезонном масштабе и в ноябре, и в феврале (рис. 9, левые колонки). Однако реконструированные среднемесячные значения температуры воздуха примерно на 2° C выше в декабре и январе и на 2°–5° C ниже в марте.

Корреляции между наблюдаемыми и реконструированными на основе WT сезонными и месячными значениями осадков в основном положительные. Однако эти значения часто не являются статистически значимыми и в целом существенно ниже и пространственно более неоднородно распределены, чем коэффициенты корреляции температур воздуха.



**Рис. 9.** Первый и второй колонки: пространственное распределение наблюдаемых и реконструированных на основе WT сезонных (WS) и месячных (ноябрь–март) значений температур [°C]. Третий и четвертый колонки: пространственное распределение корреляций и соответствующие величины значимости (Р-значения) между наблюдениями и реконструкциями.



**Рис. 10.** Линейные диаграммы: временные ряды наблюдаемых сезонных (пунктирные черные линии) и реконструированных температур [°C] (пунктирные красные линии) и тренды наблюдений (черные линии) и реконструкций (красные линии) для каждого государства Центральной Азии. В надписях выше указаны наклон тренда и р-значение для наблюдений – S(Obs), P(Obs) и реконструкций – S(Rec), P(Rec), а также корреляция между наблюдаемыми и реконструированными температурами (Cor). Гистограмма: временные ряды сезонных относительных частот WT. Наклоны тренда (S) и соответствующие им значения уровня значимости (P) приведены для каждого WT.

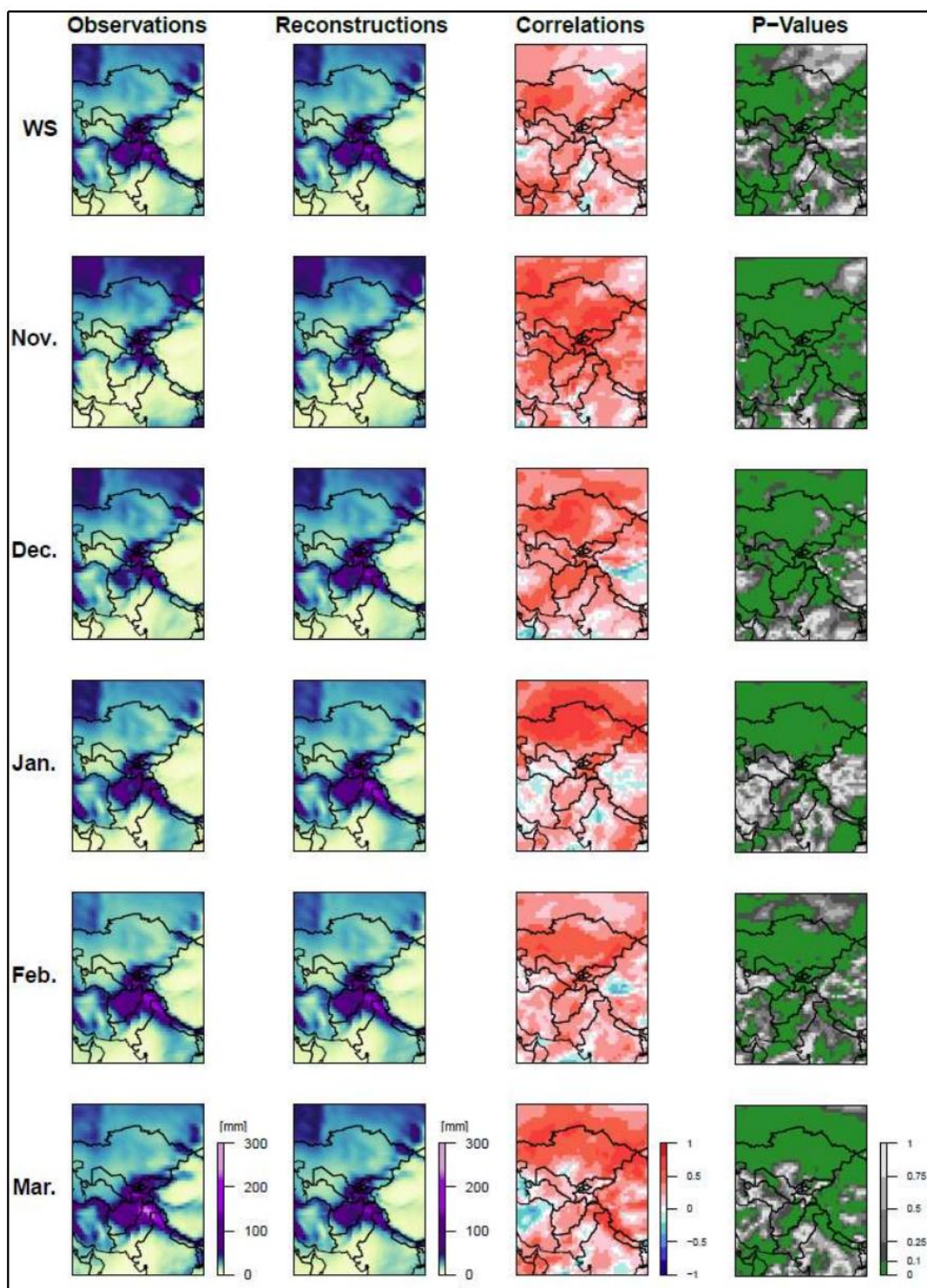
**Таблица I.** Корреляции между наблюдаемыми и реконструированными средними значениями температуры воздуха - 2 м над каждым государством Центральной Азии и всей исследуемой территорией для boreального холодного сезона и каждого месяца с ноября по март (1979–2016 г.)

| страны                  | сезон       | ноябрь      | декабрь     | январь      | февраль     | март        |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Казахстан               | 0,62        | 0,55        | 0,51        | 0,55        | 0,64        | 0,67        |
| Кыргызстан              | 0,86        | 0,76        | 0,64        | 0,72        | 0,72        | 0,81        |
| Таджикистан             | 0,8         | 0,6         | 0,6         | 0,7         | 0,75        | 0,81        |
| Узбекистан              | 0,74        | 0,68        | 0,55        | 0,62        | 0,65        | 0,75        |
| Туркменистан            | 0,77        | 0,65        | 0,59        | 0,59        | 0,66        | 0,7         |
| <b>Центральная Азия</b> | <b>0,76</b> | <b>0,65</b> | <b>0,58</b> | <b>0,64</b> | <b>0,68</b> | <b>0,75</b> |

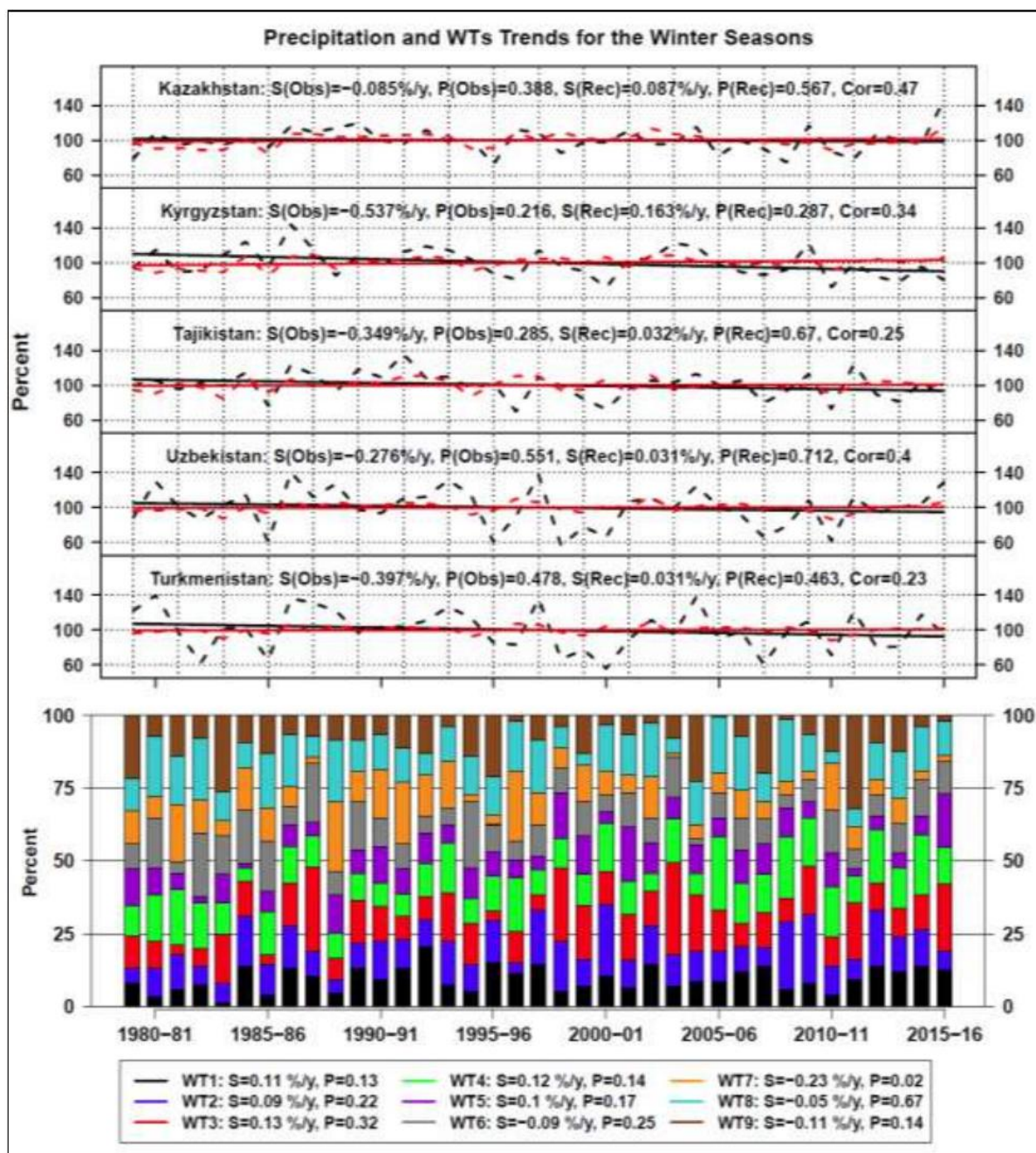
В сезонном масштабе корреляции для температуры значительны по всей области и составляют значения от 0,2 до 0,8 с максимальными значениями над западным и юго-восточным Казахстаном. Корреляции в национальном масштабе превышают 0,6 для всех стран Центральной Азии.

Наиболее высокие корреляции в месячном масштабе наблюдаются в ноябре и марте. Значения являются статистически значимыми и превышают 0,6 на большей части территории Центральной Азии. С декабря по март корреляции очень значительны над Северным Казахстаном и незначительно снижаются в направлении юго-западной и юго-восточной частей исследуемой территории. Таким образом, в Казахстане наблюдаются самые высокие значения корреляции. Узбекистан и Туркменистан характеризуются более низкими значениями корреляции по сравнению с Кыргызстаном и Таджикистаном, однако корреляции всегда превышают  $r = 0,5$ .

Ежемесячные и сезонные паттерны осадков характеризуются высокими пространственными и временными вариациями (рис. 11, левые колонки; рис. 12, линейные графики) и корреляция между реконструкциями и наблюдениями не всегда значительна. Абсолютные различия между среднемесячными значениями наблюдений и реконструкций незначительны. Однако низкие и незначительные корреляции для Узбекистана, Туркменистана и Северо-Восточного Казахстана показывают, что вариации аномалий осадков лишь в некоторой степени объясняются составом WT (рис. 11, правые колонки и таблица II). Этот результат дополнительно подтверждается очень низкими величинами временных рядов реконструкции.



**Рис. 11.** Первая и вторая колонка: пространственное распределение наблюдаемых и реконструированных на основе WT сезонных (WS) и месячных (ноябрь–март) сумм осадков [мм] над Центральной Азией. Третья и четвертая колонка: пространственное распределение корреляций и соответствующие значения уровня значимости (р-значения) между наблюдениями и реконструкциями.



**Рис. 12.** Линейные графики: временные ряды сезонных наблюдаемых (пунктирные черные линии) и реконструируемых сумм осадков [°C] (пунктирные красные линии) и тренды наблюдений (черные линии) и реконструкций (красные линии) для каждого государства Центральной Азии. Надписи выше включают наклон тренда и р-значение для наблюдений –  $S(\text{Obs})$ ,  $P(\text{Obs})$  и реконструкций –  $S(\text{Rec})$ ,  $P(\text{Rec})$ , а также корреляцию между наблюдаемыми и реконструированными суммами осадков ( $\text{Cor}$ ). Гистограмма: временной ряд сезонных относительных частот WT. Наклоны тренда ( $S$ ) и соответствующее значение уровня значимости ( $P$ ) приведены для каждого WT.

**Таблица II.** Корреляции между наблюдаемыми и реконструированными суммами осадков для каждого государства Центральной Азии и всей исследуемой территории для boreального холодного сезона и каждого месяца с ноября по март (1979–2016 г.).

| страны                      | сезон       | ноябрь      | декабрь     | январь      | февраль     | март        |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Казахстан                   | 0,47        | 0,71        | 0,61        | 0,75        | 0,61        | 0,62        |
| Кыргызстан                  | 0,34        | 0,75        | 0,44        | 0,51        | 0,44        | 0,12        |
| Таджикистан                 | 0,25        | 0,72        | 0,42        | 0,41        | 0,35        | 0,15        |
| Узбекистан                  | 0,4         | 0,64        | 0,44        | 0,24        | 0,47        | 0,24        |
| Туркменистан                | 0,23        | 0,65        | 0,44        | 0,06        | 0,22        | 0,17        |
| <b>Центральная<br/>Азия</b> | <b>0,34</b> | <b>0,69</b> | <b>0,47</b> | <b>0,39</b> | <b>0,42</b> | <b>0,26</b> |

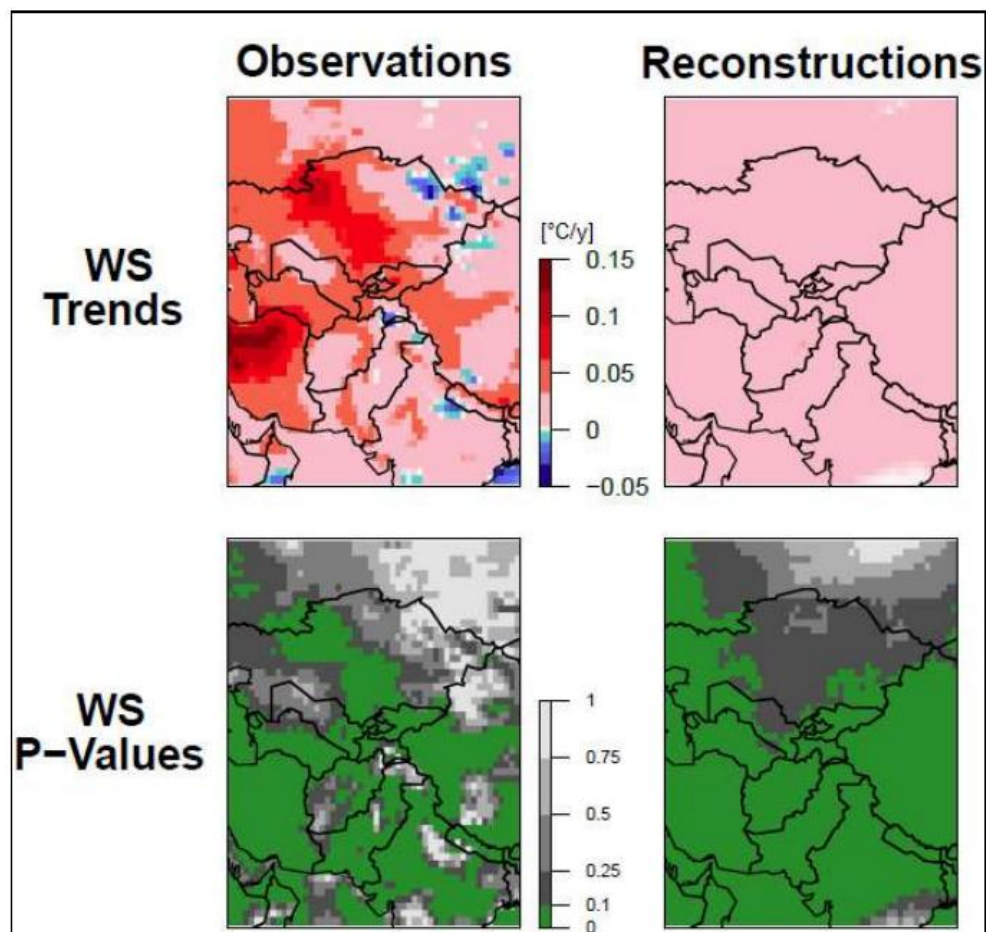
Сравнение временных рядов осадков результатов с сезонными составами WT на рис. 12, тем не менее, указывает на то, что влажные зимние сезоны (1980–1981, 1986–1988, 1992–1995, 1997–1998, 2002–2003, 2004–2005, 2009–2010, 2011–2012 и 2014–2016) связаны с довольно высокими относительными частотами двух самых влажных паттернов WT1 и WT3, а также пониженными частотами трех самых сухих паттернов WT4, WT6 и WT9. Сезоны с засушливыми климатическими условиями (1982–1983, 1985–1986, 1995–1997, 1998–2001, 2007–2009, 2010–2011 и 2012–2014) характеризуются инвертированными составами WT. Однако, например, засуха во время события Ланьинья 1988–1989 гг. не воспроизводится реконструкцией на основе WT.

#### 4.3. Тенденции температуры воздуха, осадков и частоты WT

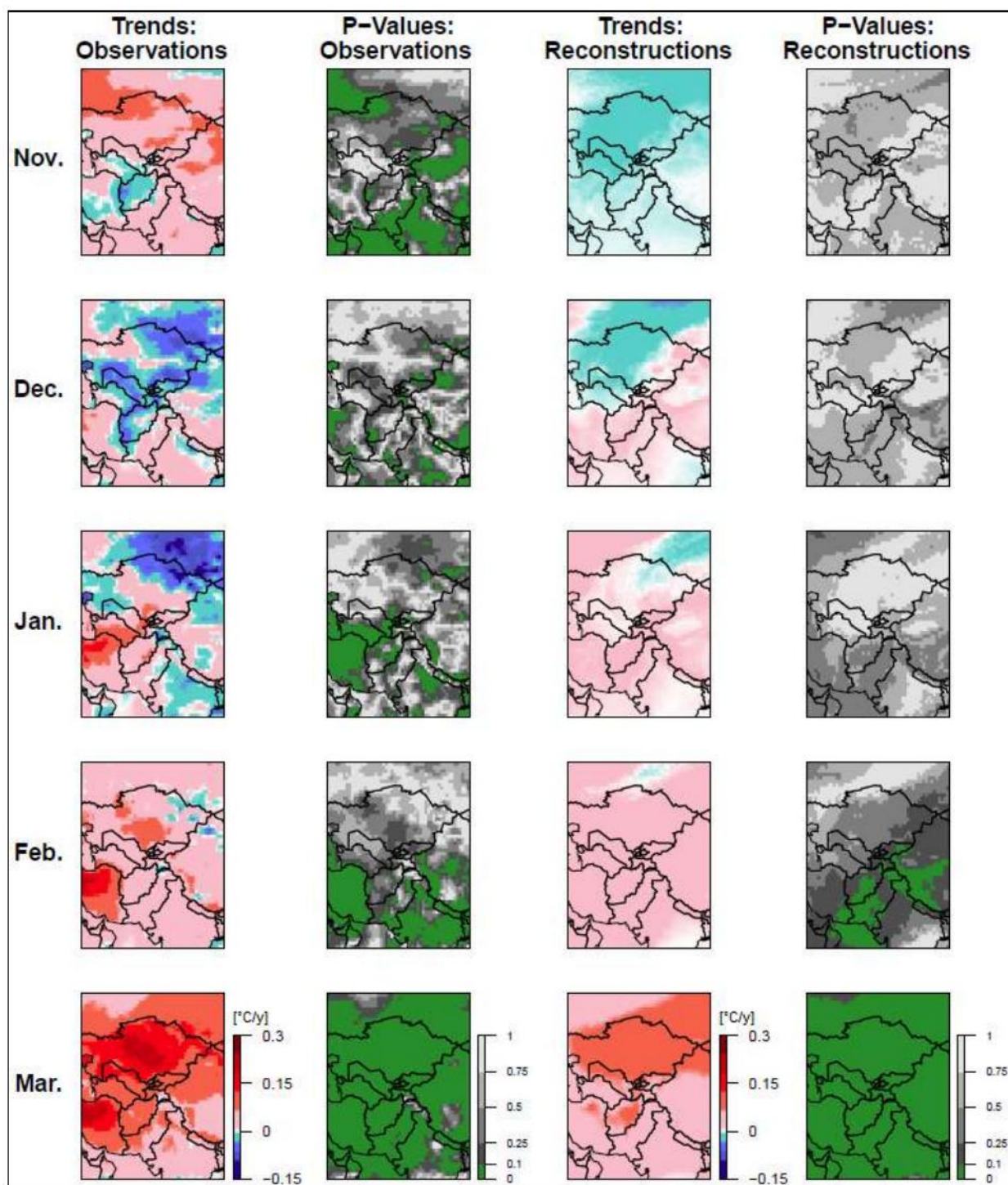
Тенденции наблюдаемых сезонных температур воздуха положительны почти на всей исследуемой территории и варьируются в среднем от 0,025 °C/год в Таджикистане до 0,047 °C/год в Туркменистане (рис. 10, линейные диаграммы, рис. 13 и таблица III). По Казахстану, Таджикистану и Узбекистану тенденции статистически незначимы.

Март характеризуется очень высокими и сильно значимыми трендами температуры воздуха (рис. 14, левые колонки). Усредненные тенденции варьируются от 0,096 °C до 0,147 °C в год по Казахстану, Узбекистану, Туркменистану и Кыргызстану и достигают 0,25 °C/год по Центральному Казахстану (таблица III). Тенденция по Таджикистану менее выражена (0,059 °C/год) и не является статистически значимой. Максимальное значение 0,25 °C/год соответствует повышению температуры воздуха более чем на 8 °C в период с 1979 по 2016 год. На такой высокий тренд, скорее всего, влияют экстремальные значения в начале или конце временного ряда и он, безусловно, завышен. Однако в наблюдаемых временных рядах явно прослеживается повышение температуры воздуха.





**Рис. 13.** Пространственное распределение трендов сезонных наблюдаемых (левая колонка) и реконструированных (правая колонка) средних значений температуры воздуха на высоте 2 м [ $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ] (тренды WS) и соответствующих значений уровня значимости (WS р-значения) над Центральной Азией для бореального зимнего сезона с 1979 по 2016 год.



**Рис. 14.** Пространственное распределение трендов месячных наблюдаемых (первая колонка) и реконструированных (вторая колонка) средних значений температуры воздуха на высоте 2 м [ $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ] и соответствующих значений уровня значимости (р-значений наблюдения, р-значений реконструкции) над Центральной Азией с ноября по март (1979–2016 г.).

**Таблица III.** Тренды наблюдаемых (черные значения) и реконструированных (красные значения) средних значений температуры воздуха за десятилетие [ $^{\circ}\text{C}/\text{десятилетие}$ ] для каждого государства Центральной Азии для бореального холодного сезона и каждого месяца с ноября по март (1979–2016 г.). Статистически значимые тенденции выделены (\*).

| страна       |        | сезон | ноябрь | декабрь | январь | февраль | март  |
|--------------|--------|-------|--------|---------|--------|---------|-------|
| Казахстан    | S(Obs) | 0,43  | 0,53   | -0,25   | -0,12  | 0,4     | 1,47* |
|              | S(Rec) | 0,19  | -0,11  | -0,07   | 0,04   | 0,21    | 0,84* |
| Кыргызстан   | S(Obs) | 0,41* | 0,3    | -0,35   | 0,2    | 0,39    | 0,96* |
|              | S(Rec) | 0,2*  | -0,05  | 0,04    | 0,1    | 0,24    | 0,64* |
| Таджикистан  | S(Obs) | 0,25  | 0,15   | -0,27   | 0,06   | 0,21    | 0,59  |
|              | S(Rec) | 0,2*  | -0,05  | 0,05    | 0,09   | 0,24    | 0,57* |
| Узбекистан   | S(Obs) | 0,33  | 0,09   | -0,4    | 0,2    | 0,36    | 1,18* |
|              | S(Rec) | 0,2*  | -0,1   | -0,05   | 0,04   | 0,21    | 0,68* |
| Туркменистан | S(Obs) | 0,47* | -0,04  | -0,15   | 0,66   | 0,5     | 0,99* |
|              | S(Rec) | 0,19* | -0,09  | -0,03   | 0,05   | 0,18    | 0,58* |

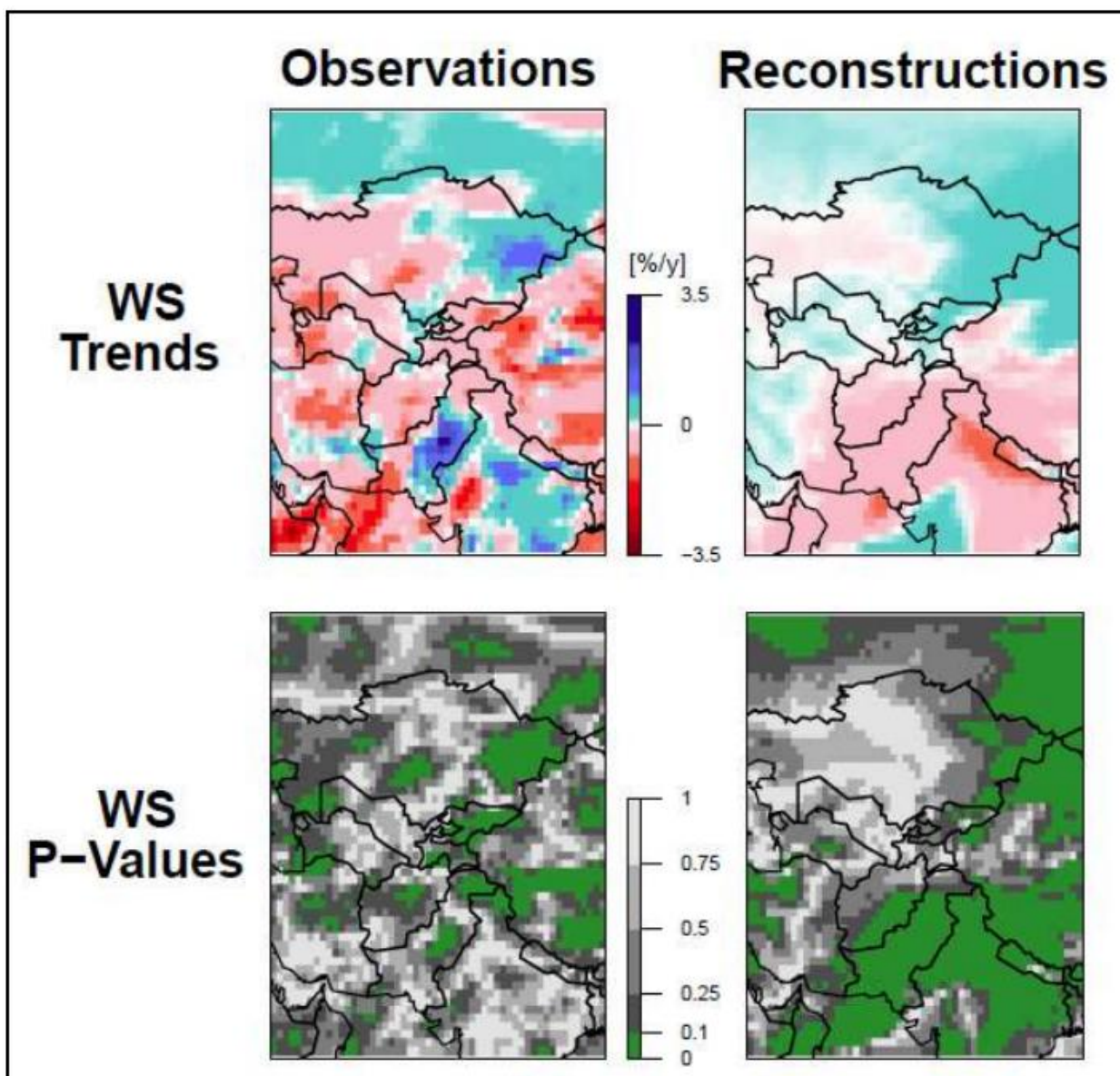
Тенденции температуры воздуха в бореальный холодный сезон и в марте, скорее всего, вызваны увеличением частоты теплых паттернов WT3–WT5, которые связаны с антициклонической аномалией над Южной Азией и юго-западной адвекцией теплых тропических воздушных масс в Центральную Азию (таблица V). Холодные паттерны WT7 и WT9, которые сопровождаются сильной циклонической аномалией над Южной Азией и адвекцией полярных воздушных масс, демонстрируют отрицательные частотные тенденции. Более холодные паттерны WT2 (с южным меридиональным ветром) и WT6 также демонстрируют отрицательные частотные тенденции в марте. Хотя реконструированные температуры характеризуются более низкими тенденциями, чем наблюдаемые (рис. 14), около 50 % сезонного тренда и 60 % тренда в марте могут быть отнесены к изменениям частоты WT.

Следует отметить, что в декабре над Узбекистаном, Северо-Восточным Казахстаном и юго-восточной частью Центральной Азии наблюдаются отрицательные и частично значимые температурные тренды. Тенденция к охлаждению связана с увеличением частоты более холодных паттернов WT1 и WT2 (таблица V), то есть с увеличением частоты полярных вспышек. В январе для Северо-Восточного Казахстана выявлены отрицательные (и частично значимые) тенденции в диапазоне от  $-0,02^{\circ}\text{C}$  до  $-0,15^{\circ}\text{C}$  в год, однако для остальной части целевой области положительные тенденции очевидны. В ноябре положительные тенденции от  $0,05^{\circ}\text{C}$  до  $0,1^{\circ}\text{C}$  в год наблюдаются для всей Центральной Азии. Температурные тренды в январе и ноябре не могут быть объяснены изменением частоты WT (рис. 14).

**Таблица IV.** Тенденции частот WT за десятилетие [%/десятилетие]. WT отсортированы по аномалиям температуры воздуха над Центральной Азией от сильно положительных (темно-красные) до сильно отрицательных (темно-синие). Статистически значимые тенденции выделены (\*).

|     | температурные аномалии   | WS    | ноябрь | декабрь | январь | февраль | март  |
|-----|--------------------------|-------|--------|---------|--------|---------|-------|
| WT5 | Сильно положительные     | 1     | -2     | 0       | 0      | 0       | 0,0   |
| WT3 | Положительные            | 1,3   | 0      | 0       | 0      | 0       | 4,4*  |
| WT4 | Положительные            | 1,2   | 0      | 0       | 0      | 0,0*    | 2,9*  |
| WT8 | Положительные            | -0,5  | 0      | 0       | 0      | -0,4    | 0     |
| WT1 | В основном отрицательные | 1,1   | 0      | 2,1     | 0      | 2,4*    | 0     |
| WT6 | В основном отрицательные | -0,9  | 0      | 0       | 0      | -1,4    | -2,5* |
| WT2 | Отрицательные            | 0,9   | 0      | 3,2*    | 2,2    | 0       | -3,1* |
| WT7 | Сильно отрицательные     | -2,3* | 0      | 0       | -3,4   | -2,1    | 0     |
| WT9 | Сильно отрицательные     | -1,1  | 0      | 0,0*    | 0      | -1,2    | 0     |

Результаты анализа тенденций сезонных сумм осадков указывают на незначительную тенденцию к иссушению для большинства регионов Центральной Азии. Отрицательные тенденции выпадения осадков колеблются от -0,01 % до -1,5 % в год, но статистически значимы только для Таджикистана и Кыргызстана. В Восточном Казахстане наблюдаются положительные тенденции в диапазоне от 0,01 %/год до 1,5 %/год (рис. 12, линейные графики, рис. 15 и таблица VI). Тенденции реконструкции осадков показывают сходную пространственную картину, особенно над Казахстаном, но мелкомасштабные особенности меняющихся трендов осадков не воспроизводятся реконструкциями. Это указывает на ограниченные возможности классификации WT в объяснении наблюдаемых изменений осадков.



**Рис. 15.** Пространственное распределение трендов сезонных наблюдаемых (левая колонка) и реконструированных (правая колонка) сумм осадков [%/год] (тренды WS) и соответствующих им значений уровня значимости (WS р-значений) над Центральной Азией для бореального зимнего сезона (1979–2016 г.).

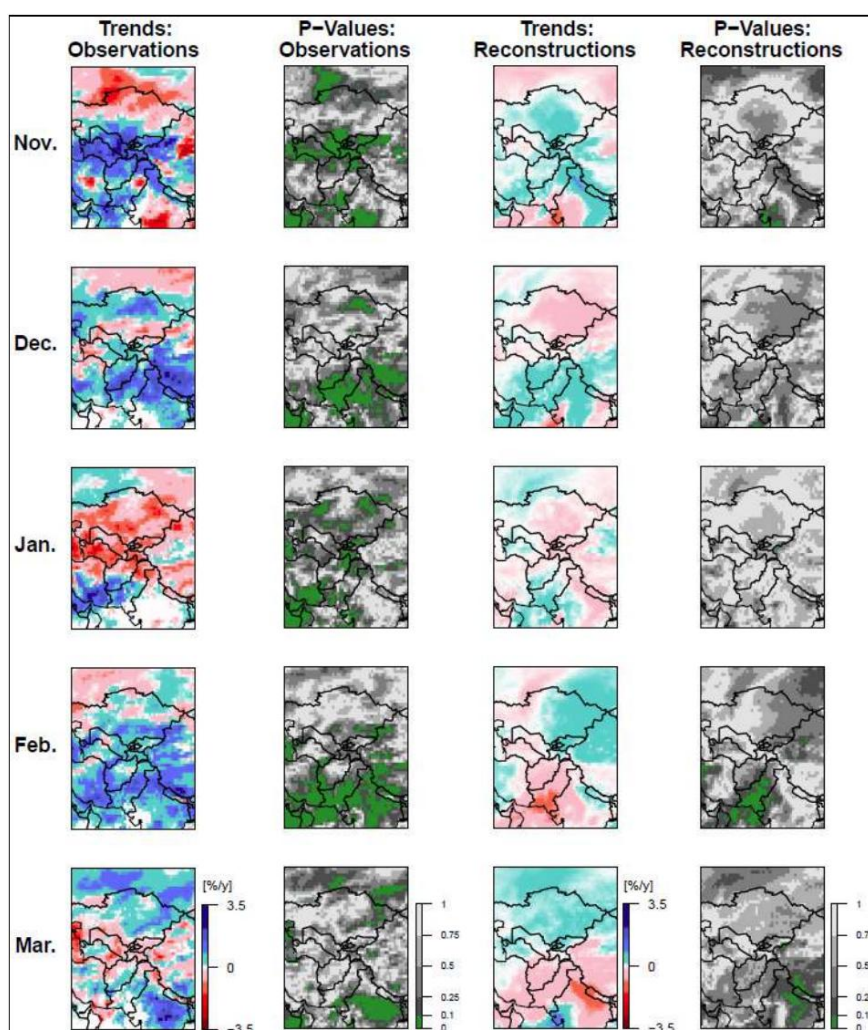
**Таблица V.** Тенденции наблюдаемых (черные значения) и реконструированных (красные значения) сумм осадков за десятилетие [%/десятилетие] для каждого государства Центральной Азии для бореального холодного сезона и каждого месяца с ноября по март (1979–2016 г.). Статистически значимые тенденции выделены (\*).

| страна       |        | сезон | ноябрь | декабрь | январь | февраль | март  |
|--------------|--------|-------|--------|---------|--------|---------|-------|
| Казахстан    | S(Obs) | -0,85 | -1,92  | 3,05    | -6,58  | 2,01    | 2,03  |
|              | S(Rec) | 0,87  | 1,03   | -1,75   | -0,59  | 1,4     | 1,48  |
| Кыргызстан   | S(Obs) | -5,37 | 9,97   | -1,38   | -8,61  | 3,78    | -2,58 |
|              | S(Rec) | 1,63  | 1,02   | -1,61   | -1,2   | 2,76    | 1,01  |
| Таджикистан  | S(Obs) | -3,49 | 13,75* | 2,51    | -8,62  | 5,13    | -3,65 |
|              | S(Rec) | 0,32  | 1,76   | -0,23   | -1,43  | 0,54    | -0,38 |
| Узбекистан   | S(Obs) | -2,76 | 13,93  | 0,35    | -6,7   | 4,39    | -4,31 |
|              | S(Rec) | 0,31  | 0,54   | -0,21   | -0,28  | 0,28    | 0,56  |
| Туркменистан | S(Obs) | -3,97 | 15,87  | -1,3    | -12,02 | 4,81    | -1,87 |
|              | S(Rec) | 0,31  | 0,03   | -0,24   | 0,23   | -1,07   | 0,27  |

**Таблица VI.** Тенденции частот WT за десятилетие [%/десятилетие] в Центральной Азии с 1979 по 2016 г. WT отсортированы по аномалиям осадков от сильно отрицательных (темно-красный) к сильно положительному (темно-синий). Статистически значимые тенденции выделены (\*).

|     | аномалии осадков                        | WS    | ноябрь | декабрь | январь | февраль | март      |
|-----|---|-------|--------|---------|--------|---------|-----------|
| WT4 | Сильно отрицательные                    | 1,2   | 0      | 0       | 0      | 0,0*    | 2,9*      |
| WT9 | Сильно отрицательные                    | -1,1  | 0      | 0,0*    | 0      | -1,2    | 0         |
| WT6 | Сильно отрицательные                    | -0,9  | 0      | 0       | 0      | -1,4    | -<br>2,5* |
| WT2 | В основном отрицательные                | 0,9   | 0      | 3,2*    | 2,2    | 0       | -<br>3,1* |
| WT5 | SE: положительные/<br>NW: отрицательные | 1     | -2     | 0       | 0      | 0       | 0,0       |
| WT8 | В основном положительные                | -0,5  | 0      | 0       | 0      | -0,4    | 0         |
| WT7 | Положительные                           | -2,3* | 0      | 0       | -3,4   | -2,1    | 0         |
| WT1 | Сильно положительные                    | 1,1   | 0      | 2,1     | 0      | 2,4*    | 0         |
| WT3 | Сильно положительные                    | 1,3   | 0      | 0       | 0      | 0       | 4,4*      |

В ноябре положительные и значимые тенденции от 0,01 % до 3,5 % в год над южной частью Центральной Азии очевидны как в наблюдениях, так и в реконструкциях. Это увеличение количества осадков, по-видимому, сопровождается уменьшением (незначительным) частотного тренда сухого WT5 (рис. 16, таблица VII). Декабрь характеризуется диполем с отрицательными тенденциями осадков на севере и положительными тенденциями на юге целевой области, которые также хорошо воспроизводятся реконструкцией на основе WT. В январе наблюдалась тенденции к снижению от -0,1%/год и -1,5%/год, они обнаружены над Таджикистаном и Кыргызстаном, а также Казахстаном и Туркменистаном. Отрицательные тенденции, скорее всего, связаны с увеличением и уменьшением частот сухих и влажных паттернов WT2 и WT7 соответственно (таблица VI).



**Рис. 16.** Пространственное распределение трендов месячных наблюдаемых (первая колонка) и реконструированных (вторая колонка) сумм осадков [%/год] и соответствующих значений уровня значимости (р-значений наблюдения, р-значений реконструкции) над Центральной Азией с ноября по март (1979–2016 г.)

## 5. Обсуждение и заключение

На основе методов, предложенных Gerlitz et al. (2018), в данной работе исследуется атмосферная циркуляция и ее влияние на температуру и осадки над Центральной Азией во время бореального холодного сезона в сезонном и месячном масштабах. Классификация WT проводится на основе улучшенного кластерного анализа  $k$ -средних. Полученные 9 WT отражают сезонный цикл инсоляции и смещение полярной фронтальной зоны на юг в течение основного зимнего сезона. В то время как основные зимние месяцы находятся под влиянием паттернов с отрицательными аномалиями GPH и температуры на высоте 2 м (WT7 и WT9), теплые паттерны с положительными аномалиями GPH (WT3–WT5) в основном происходят в начале и конце бореального холодного сезона.

Временные и пространственные характеристики 9 WT отражают результаты других исследований (к примеру, Martyn, 1992; Mariotti, 2007; Schiemann et al., 2008; 2009; Bothe et al., 2011; Gerlitz et al., 2018), согласно которым на температуру воздуха и количество осадков над Центральной Азией существенно влияют следующие три фактора: положение и сила западного струйного течения, проявление аномалий давления над Северной и Южной Азией и рельеф исследуемой территории.

Положительные аномалии температуры воздуха вызываются аномалиями антициклонической циркуляции над Южной Азией, приводящими к юго-западным ветрам, которые переносят теплые тропические воздушные массы из Красного и Аравийского морей в целевую область. Холодные WT связаны с северо-западным притоком полярных воздушных масс над Казахстаном и Узбекистаном и циклонической аномалией над Южной Азией. Смещение западного струйного течения на юг усиливает перенос влажных воздушных масс в целевую область. Антициклоническая аномалия над Южной Азией приводит к юго-западной адвекции влажных тропических воздушных масс из Каспийского моря, Красного моря и Персидского залива в южные и восточные районы Центральной Азии. WT, характеризующиеся как смещением западного потока на юг, так и антициклонической аномалией над Южной Азией, отличаются сильно положительными аномалиями осадков (WT1 и WT3). Наибольшее количество осадков наблюдается на наветренных склонах Тянь-Шаня, Памира и Алтая, которые подвержены воздействию северо- и юго-западного течения. Очень сухие условия связаны с антициклоническими аномалиями над Центральной Россией и северной частью Центральной Азии и циклоническими аномалиями над Южной Азией (WT4, WT6 и WT9).

Высокие корреляции между наблюдаемыми и реконструированными на основе WT температурными полями показывают, что примененная классификация WT способна воспроизводить изменчивость температуры над Центральной Азией в сезонном масштабе и для каждого месяца. Напротив, корреляции между наблюдениями и реконструкциями осадков характеризуются гораздо более низкими сезонными значениями. Коэффициенты корреляции в месячном масштабе сильно варьируются, но



в большинстве случаев являются положительными. На следующем этапе проверка с использованием других типов данных, например, метеорологических данных со станций наблюдения, позволит провести более глубокую проверку.

Обнаруженные сезонные температурные тренды согласуются с выводами Gerlitz et al. (2018). В период с 1979 по 2016 год обнаружена значительная тенденция наблюдений ERA-Interim почти по всей целевой области. Значения варьируются в среднем между 0,025 °C/год в Таджикистане и 0,047 °C/год в Туркменистане. Около 50 % от возрастающего тренда может быть отнесено к изменениям частоты WT. В то время как частоты холодных паттернов WT7 и WT9 имеют отрицательную тенденцию, частоты теплых паттернов WT3, WT4 и WT5 увеличиваются в течение зимнего сезона.

В месячном масштабе самые высокие температурные тренды выявлены в марте. Наблюдаемые тенденции составляют 0,059 °C/год в Таджикистане и 0,147 °C/год в Казахстане. Максимальные значения 0,25 °C/год наблюдались в Центральном Казахстане, что соответствует изменению температуры на 5 °C в период между 1979 и 2016 годами. Эта тенденция, безусловно, преувеличена, например, из-за ограниченной длины временного ряда или экстремальных значений в начале или конце записи данных. Помимо этих недостатков, в течение всего периода в наблюдаемых и реконструируемых временных рядах прослеживается сильный рост температуры воздуха. Более 60 % положительного температурного тренда в марте можно отнести к изменениям частоты WT. Частоты трех самых холодных паттернов WT2, WT7 и WT9 имеют отрицательную тенденцию, тогда как частоты теплых паттернов WT3, WT4 и WT5 увеличиваются. Тенденции высокой температуры воздуха в марте вносят большой вклад в тенденции температуры в сезонном масштабе. Сезонные и месячные тенденции осадков часто связаны с высокой степенью неопределенности. Сезонные тенденции указывают на тенденцию незначительной засушливости над Западным Казахстаном и четырьмя другими государствами Центральной Азии. Исключительно в Восточном Казахстане наблюдается положительная тенденция. Несмотря на вышеупомянутые ограничения анализа тенденций, наши результаты согласуются с предыдущими исследованиями изменений температуры и осадков в Центральной Азии (см., например, Giese and Mossig, 2004; Chen et al., 2009; IPCC, 2014; Barlow and Hoell, 2015).

В целом, сочетание повышения температуры воздуха и незначительного уменьшения количества осадков в течение бореального холодного сезона приведет к повышению риска, связанного с водой в Центральной Азии. Таким образом, получение глубоких знаний о взаимосвязи между частотами WT, параметрами приповерхностного слоя и режимами крупномасштабной циркуляции крайне необходимо Центральной Азии, которая очень уязвима к опасностям, связанным с водой. Таким образом, результаты представленного исследования могут способствовать разработке краткосрочных прогнозов водообеспеченности.

Помимо собственных конкретных выводов, данное исследование подчеркивает большую ценность продуктов реанализа климата для региональных климатических исследований в условиях дефицита данных в Центральной Азии. Такие

пространственно-временные полные наборы данных о приповерхностном климате и вышележащей атмосферной циркуляции позволяют анализировать климатические условия в региональном масштабе и, в частности, исследовать фундаментальные метеорологические процессы, ответственные за наблюдаемую изменчивость и изменение климата. Таким образом, авторы рекомендуют использовать данные реанализа для комплексного анализа регионального климата, его изменчивости и изменений в Центральной Азии. Хотя метеорологические наблюдения являются важной основой для изучения приповерхностного климата, наборы данных реанализа позволяют дополнительно изучить соответствующие условия в верхней тропосфере. Выявленные взаимосвязи между наблюдаемыми аномалиями температуры и осадков и крупномасштабными атмосферными условиями позволяют лучше понимать климатическую систему и интерпретировать наблюдаемые изменения в более широком контексте.

## 5. Список литературы

1. Apel, H., Abdykerimova, Z., Agalhanova, M., Baimaganbetov, A., Gavrilenko, N., Gerlitz, L., Kalashnikova, O., Unger-Shayesteh, Katy., Vorogushyn, S., and Gafurov, A., 2018. Statistical forecast of seasonal discharge in Central Asia for water resources management: development of a generic linear modelling tool for operational use, *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 22, pp. 2225-2254.
2. Bao, X., and F. Zhang, 2012. Evaluation of NCEP–CFSR, NCEP–NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 Reanalysis Datasets against Independent Sounding Observations over the Tibetan Plateau, *Journal of climate*, Vol. 26, pp. 206–214. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00056.1>.
3. Barlow, M., Cullen, H. and Lyon, B., 2002. Drought in central and southwest Asia: La Niña, the warm pool, and Indian Ocean precipitation, *Journal of climate*, Vol. 15, No. 7, pp. 697-700.
4. Barlow, M. A. and Tippett, M. K., 2008. Variability and Predictability of Central Asia River Flows: Antecedent Winter Precipitation and Large-Scale Teleconnections, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 19, No. 9, pp. 1334-1349.
5. Barlow, M. and Hoell, A., 2015. Drought in the Middle East and Central-Southwest Asia During Winter 2013/14, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 96, No. 7, pp. 71-76.
6. Barlow, M., Zaitchik, B., Paz, S., Black, E., Evans, J. and Hoell, A., 2016. A review of drought in the Middle East and southwest Asia, *Journal of climate*, Vol. 29, No. 23, pp. 8547-8574.
7. Böhner, J., 2006. General climatic controls and topoclimatic variations in Central and High Asia. *Boreas*, Vol. 782, No. 35, pp. 279-295.

8. Bothe, O., Klaus, F. and Xiuhua Z., 2011. Precipitation climate of Central Asia and the large-scale atmospheric circulation, *Theoretical and applied climatology*, Vol. 108, pp. 345-354.
9. Bradley, P. S., Fayyad, U. M. and Reina, C., 1998. Scaling Clustering Algorithms to Large Databases. In: *KDD 98*, pp. 9-15.
10. Cahalan, R. F., 1983. EOF spectral estimation in climate analysis. *Second International Meeting on Statistical Climatology*, pp. 1-4.
11. Chanysheva, S. G., Subbotina, O. I., Petrov, U. V., Egamberdiyev, K. T., Aizenshtat, B. A. and Leukhina, G. N., 1995. *Variability of the Central Asian Climate*. Central Asian Hydrometeorological Research Institute, Tashkent. [in Russian]
12. Chen, F., Wang, J., Jin, L., Zhang, Q., Li, J. and Chen, J., 2009. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years. *Frontiers of Earth Science in China*, pp. 3-42.
13. 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., Kállberg, M., 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. and Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, Vol. 137, No. 656, pp. 553-597.
14. de Pauw, B., 2007. Principal biomes of Central Asia. In: Lal R., Sulaimonov, M., Stewart, B. A., Hansen, D. O., Doraiswamy, P., In: *Climate change and terrestrial carbon sequestration in Central Asia*, Pp. 137-146. Taylor and Francis, New York, USA.
15. Dimri, A. P., 2013. Interannual variability of Indian winter monsoon over the Western Himalayas, *Global and planetary change*, Vol. 106, pp. 39-50.
16. Dukhovny, V., 2010. Present problems of irrigated agriculture in Aral Sea basin and future decisions. Oral Presentation at the International Scientific Symposium “Water in Central Asia”, Tashkent, 24-26 November 2010. Available at: <http://www.cawaproject.net/book/200> (Accessed August 10, 2012).
17. Dukhovny, V. A. and de Schutter, J. 2011. *Water in Central Asia: past, present, future*. CRC Press/Balkema.
18. ECMWF, 2016. ECMWF. Forecast. Datasets. ERA-INTERIM. <https://www.ecmwf.int/> (Accessed November 28, 2016).
19. Forgy, E. W., 1965. Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications, *Biometrics* Vol. 21, pp. 768-769.
20. Gerlitz, L., O. Conrad, A. Thomas, and J. Böhner, 2014. Warming patterns over the Tibetan Plateau and adjacent lowlands derived from elevation- and bias-corrected ERA-Interim data, *Climate research*, Vol. 58, pp. 235–246, Available at: <https://doi.org/10.3354/cr01193>.

21. Gerlitz, L., Conrad, O. and Böhner, J., 2015. Large-scale atmospheric forcing and topographic modification of precipitation rates over High Asia—a neural-network-based approach, *Earth system dynamics*, Vol. 6, No. 1, p. 61.
22. 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, No. 11, pp. 4605-4623.
23. 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>
24. Giese, E. and Mossig, I., 2004. Klimawandel in Zentralasien (Climate Change in Central Asia). Zentrum für Internationale Entwicklungs- und Umweltforschung: Discussion papers 17, 70, Giessen. [in German]
25. Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots, *Geophysical research letters*, Vol. 33, L08707.
26. Golian, S., Mazdiyasn, O. and AghaKouchak, A., 2015. Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran, *Theoretical and applied climatology*, Vol. 119, No. 3-4, pp. 679-688.
27. Hoell, A., Funk, C. and Barlow, M., 2014. The regional forcing of Northern hemisphere drought during recent warm tropical west Pacific Ocean La Niña events, *Climate dynamics*, Vol. 42, No. 11-12, pp. 3289-3311.
28. Huth, R., Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Cahynová, M., Kyselý, J. and Tveito, O.E., 2008. Classifications of atmospheric circulation patterns, *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1146, pp. 105-152.
29. Intergovernmental Panel on Climate Change, ed., 2014. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. Available at: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324> (Accessed February 20, 2018).
30. Jacobeit, J., 2010. Classifications in climate research, *Physics and chemistry of the Earth. Parts A/B/C*, Vo. 35, No. 9-12, pp. 411-421.
31. Käsmacher, O., and C. Schneider, 2011. An Objective Circulation Pattern Classification for the Region of Svalbard. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, Vol. 93, pp. 259–271. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2011.00431.x>.
32. Lloyd, S., 1982. Least squares quantization in PCM, *IEEE transactions on information theory*, Vol. 28, No. 2, pp. 129-137.
33. Maćkiewicz, A. and Ratajczak, W., 1993. Principal components analysis (PCA), *Computers and geosciences*, Vol. 19, pp. 303-342.
34. MacQueen, J., 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, Vol. 1, No. 14, pp. 281-297.

- 
35. Martyn, D., 1992. *Climates of the world. developments in atmospheric science*. Elsevier, Amsterdam [u.a.], Netherlands; PWN, Warszawa, Poland.
  36. Mariotti, A., 2007. How ENSO impacts precipitation in southwest central Asia, *Geophysical research letters*, Vol. 34, No. 16.
  37. Michelangeli, P. A., Vautard, R. and Legras, B., 1995. Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity, *Journal of the atmospheric sciences*, Vol. 52, No. 8, pp. 1237-1256.
  38. Mirzabaev, A., 2013. Impact of weather variability and climate change on agricultural revenues in Central Asia, *Quarterly journal of international agriculture*, Vol. 52, No. 3, pp. 179-194.
  39. Natural Earth, 2019. Natural Earth. Downloads. Available at: <https://www.naturalearthdata.com/downloads>. (Accessed January 14, 2019).
  40. QGIS, 2019. Laden Sie QGIS für Ihre Plattform herunter. Available at: <https://www.qgis.org/de/site/forusers/download.html>. (Accessed January 14, 2019).
  41. Rasmusson, E. M., Arkin, P. A., Chen, W. Y. and Jalickee, J. B. 1981. Biennial variations in surface temperature over the United States as revealed by singular decomposition, *Monthly weather review*, Vol. 109, No. 3, pp. 587-598.
  42. Roller, C. D., Qian, J. H., Agel, L., Barlow, M. and Moron, V., 2016. Winter weather regimes in the northeast United States, *Journal of climate*, Vol. 29, No. 8, pp. 2963-2980.
  43. Schiemann, R. D., Lüthi, P. L. and Vidale, Schär C., 2008. The precipitation climate of Central Asia - intercomparison of observational and numerical data sources in a remote semiarid region, *International journal of climatology*, Vol. 28, pp. 3-24.
  44. Schiemann, R., Lüthi, D. and Schär, C., 2009. Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region, *Journal of climate*, Vol. 22, No. 11, pp. 2940-2957.
  45. Sommer, R., Glazirinaa, M., Yuldashev, T. , Otarov, A., Ibraeva, M., Martynova, L., Bekenov, M., Kholov, B., Ibragimov, N., Kobilov, R., Karaev, S., Sulstonov, M., Khasanova, F., Esanbekov, M., Mavlyanov, D., Isaev, S., Abdurahimov, S., Ikramov, R., Shezdyukova, L. and de Pauw E., 2013. Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 178, pp. 78-99.
  46. SRTM, 2019. SRTM Data. Available at: <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>. (Accessed January 14 2019).
  47. 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: Theoretical and Applied Climatology, Vol. 108, pp. 147-160.
  48. Syed, F. S., Giorgi, F., Pal, J. S. 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, No. 2, pp. 220-235.
  49. Trigo, R. M., Gouveia, C. M. and Barriopedro, D., 2010. The intense 2007-2009 drought in the Fertile Crescent: Impacts and associated atmospheric circulation, *Agricultural and forest meteorology*, Vol. 150, No. 9, pp. 1245-1257.

- 
50. TUM (Technical University of Munich), 2018. Clusteranalyse (e-learning in German). Available at: <https://www-m9.ma.tum.de/material/felix-klein/clustering/Methoden/K-Means.php>. (Accessed January 20, 2020).
  51. 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 planetary change*, Vol. 110, pp. 4-25.
  52. Wang, A. and Zeng, X., 2012. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau, *Journal of geophysical research: Atmospheres*, Vol. 117 (D5).
  53. World Bank, 2018. The World Bank Open Data. Population, total. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>. (Accessed June 02, 2018).
  54. Yin, Z. Y., Wang, H., Liu, X., 2014. A comparative study on precipitation climatology and interannual variability in the lower midlatitude East Asia and Central Asia, *Journal of climate*, Vol. 27, No. 20, pp. 7830-7848.