

## Экстремальные климатические события в условиях наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений

*О.Г. Золина<sup>1,2)</sup> \*, Е.М. Володин<sup>3)</sup>, А.М. Стерин<sup>4)</sup>*

<sup>1)</sup> Московский физико-технический институт,  
Россия, 117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А

<sup>2)</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36

<sup>3)</sup> Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН,  
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 8

<sup>4)</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт  
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных,  
Россия, 249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, 6

\*Адрес для переписки: [zol@sail.msk.ru](mailto:zol@sail.msk.ru)

**Реферат.** В условиях потепления экстремальные климатические события становятся более частыми и интенсивными. Эти процессы свидетельствуют о существенных изменениях в динамике климатических экстремумов и формируют новые риски для природных и социально-экономических систем. Ущерб от климатических катастроф выражается в значительных материальных потерях, разрушении инфраструктуры, снижении урожайности сельскохозяйственных культур и росте угроз для здоровья и жизни населения. Имеющиеся многочисленные результаты анализа наблюдаемых в настоящее время изменений гидрометеорологических параметров, изложенные в научных публикациях, докладах и обзорных материалах, убедительно демонстрируют связь роста частоты и интенсивности экстремальных климатических событий с возрастанием темпов глобального потепления в XXI веке. В пользу этого утверждения относительно увеличения числа и интенсивности экстремальных климатических событий, в том числе и в предстоящие десятилетия, также убедительно свидетельствуют многочисленные результаты, предоставляемые физико-динамическими моделями климата для разных сценариев потепления.

Целью данной статьи, носящей обзорный характер, является обобщение современных научных представлений о динамике экстремальных климатических событий в условиях наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений, а также оценка их изменений в будущем с учётом региональных особенностей. В статье рассмотрены подходы к определению экстремальных климатических событий, их классификация по типу событий, приведены некоторые методы и результаты эмпирико-статистического анализа климатических данных для анализа экстремальных событий, приведен обзор глобальных тенденций их изменений и особенностей проявления изменений экстремальных событий на территории Российской Федерации. Приведены также оценки буду-

щих экстремальных событий в условиях дальнейшего роста глобальной температуры по данным глобальных климатических моделей.

**Ключевые слова.** Экстремальные события, изменения климата, волны жары, сильные осадки, наводнения, климатические модели.

## Extreme climate events under observed and projected climate change

*O.G. Zolina<sup>1,2)</sup>\*, E.M. Volodin<sup>3)</sup>, A.M. Sterin<sup>4)</sup>*

<sup>1)</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT),  
1a, Kerchinskaya str., Moscow, 117303, Russian Federation

<sup>2)</sup> Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Science (IORAS),  
36, Nakhimovskiy ave., Moscow, 117997, Russian Federation

<sup>3)</sup> Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Science (INMRAS),  
8, Gubkina str., 119333, Moscow, Russian Federation

<sup>4)</sup> All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information –  
World Data Center (RIHMI-WDC),  
8, Koroleva str., Obninsk, Kaluga region, 249035, Russian Federation

\*Correspondence address: [zol@sail.msk.ru](mailto:zol@sail.msk.ru)

**Abstract.** Under conditions of global warming, extreme climate events are becoming more frequent and more intense. These processes indicate significant changes in the dynamics of climate extremes and create new risks for natural and socio-economic systems. The damage caused by climate-related disasters is reflected in substantial economic losses, the destruction of infrastructure, reduced agricultural productivity, and increased threats to human health and life. Numerous analyses of currently observed changes in hydrometeorological parameters, presented in scientific publications, reports, and review papers, convincingly demonstrate a link between the rising frequency and intensity of extreme climate events and the accelerating pace of global warming in the twenty-first century. This conclusion – regarding the increase in the number and severity of extreme climate events, including in the coming decades – is further supported by extensive results from physical-dynamical climate models under various warming scenarios.

The aim of this review article is to synthesize current scientific understanding of the dynamics of extreme climate events under observed and projected climate change, as well as to assess their future evolution with consideration of regional characteristics. The paper discusses approaches to defining extreme climate events and their classification by event type. It also presents selected methods and results of empirical–statistical analyses of climate data used to investigate extreme events, provides an overview of global trends in their changes, and examines specific features of their manifestation across the territory of the Russian Federation.

---

addition, projections of future extreme events under continued global temperature rise are presented based on simulations from global climate models.

**Keywords.** Extreme events, climate change, heat waves, heavy precipitation, floods, climate models.

## **Введение**

В последние десятилетия экстремальные климатические события приобретают всё более выраженный характер, становясь одной из ключевых проблем современного этапа развития климатической системы Земли. Наблюдаемый рост средней глобальной температуры, обусловленный преимущественно антропогенным увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, сопровождается увеличением частоты, интенсивности и продолжительности таких явлений, как волны жары, экстремальные осадки, засухи, наводнения, ураганы и лесные пожары. Эти процессы свидетельствуют о существенных изменениях в динамике климатических экстремумов и формируют новые риски для природных и социально-экономических систем. Актуальность исследования экстремальных климатических событий обусловлена их возрастающим воздействием на общество и экономику. Ущерб от климатических катастроф выражается в значительных материальных потерях, разрушении инфраструктуры, снижении урожайности сельскохозяйственных культур и росте угроз для здоровья и жизни населения. Кроме того, учащение экстремальных климатических явлений способствует усилению социальной нестабильности, вынужденной миграции населения и увеличению неравенства между регионами с разной степенью климатической уязвимости. В условиях продолжающегося глобального потепления данные факторы приобретают долгосрочный и системный характер, что подчёркивает необходимость комплексного научного анализа.

Целью данной статьи является обобщение современных научных представлений о динамике экстремальных климатических событий, связанных с глобальным потеплением, а также оценка их возможных изменений в будущем с учётом региональных особенностей. В статье будут рассмотрены методы определения экстремальных событий, приведен обзор глобальных тенденций их изменений и особенностей изменений экстремальных событий на территории Российской Федерации. Также будут приведены прогнозируемые изменения экстремальных событий в условиях дальнейшего роста глобальной температуры.

### **Часть 1. Экстремальные климатические события: определение и классификация**

Экстремальные климатические и погодные явления определяются как необычные и достаточно редкие события, зачастую наносящие ущерб социальным и экономическим структурам и представляющие опасность здоровью и жизни людей. Они характеризуются высокой интенсивностью, продолжительностью или масштабами, выходящими за пределы обычных колебаний,

---

характерных для данной величины в конкретном месте за достаточно длительный промежуток времени. В настоящее время не существует единого общепризнанного определения того, какое событие может быть по формальным признакам отнесено к экстремальным. Очевидно, что такие события должны иметь высокую интенсивность, выделяющую их на фоне климатической изменчивости для данного параметра, они должны происходить достаточно редко и, в большинстве случаев, вызывать негативные последствия, такие как разрушения, жертвы, экономические потери или нарушение функционирования экосистем. Важно отметить, что экстремальность определяется в контексте конкретного региона. То есть, климатические события, экстремальные для северных широт, например, высокая температура или сильные осадки, могут быть обычными для тропиков, и наоборот (IPCC, 2023).

К *температурным аномалиям* относятся волны жары и волны холода. На фоне глобального потепления именно *волны жары* представляют одну из наиболее серьезных опасностей. Согласно определению Всемирной метеорологической организации (ВМО) волны жары – это период необычно жаркой погоды, длительностью не менее двух-трех дней, в течение которого температура воздуха существенно превышает средние климатические показатели, характерные для данной местности в данное время года (WMO, 2021). В разных странах, в зависимости от их географического положения, применяют разные численные критерии для определения волн жары. В России волной жары считается период, когда температура превышает среднесуточную климатическую норму на 5°C и более, в течение более 5 дней подряд (Росгидромет, 2020). Для Москвы, например, такое пороговое значение составляет 30°C. Эти периоды вызывают очень сильные негативные последствия и сопровождаются повышенной смертностью, стрессом для сельского хозяйства и повышенным потреблением электроэнергии. Крупная волна жары наблюдалась в Европе летом 2025 года. В южной Европе в конце июня 2025 г. температура превышала 40°C. Это привело к более 24 000 дополнительным смертям и экономическому ущербу для стран ЕС в размере 43 млрд евро только за 2025 год. В Центральной и Западной части России одна из наиболее сильных волн жары наблюдалась летом 2010 года, когда температурные аномалии в течение длительного периода времени достигали +4°C (например, Ревич, 2017). Следствием этого стало увеличение смертности на 56000 человек, а также масштабные лесные и торфяные пожары и сильный смог. Летом 2023 года волна жары наблюдалась в Сибири и на Дальнем Востоке. Аномалии температуры достигали +11°C на протяжении более 70 дней.

*Волны холода* – это период устойчивого понижения температуры воздуха на 5°C и более ниже климатической нормы, продолжительностью не менее 5 дней подряд. Они также представляют серьезную угрозу для здоровья людей и вызывают дополнительную нагрузку на электроснабжение, особенно в регионах с неприспособленной инфраструктурой. С глобальным потеплением волны холода становятся реже и менее интенсивнее, однако затоки холодного Арктического воздуха в южные регионы, особенно в весенний период, вызывают много негативных последствий.

---

*Экстремальные осадки* – это климатические события, при которых количество осадков существенно отклоняется от средних многолетних значений. Это могут быть как избыточные осадки (сильные ливни или снегопады), так и дефицитные (засухи). Этот тип экстремальных событий также представляет большую опасность, так как сильные ливни могут стать причиной внезапных наводнений, оползней и разрушений инфраструктуры. Так как осадки являются кластеризованным в пространстве и времени полем и проявляются локально, то такие факторы, как топография, урбанизация и изменение землепользования могут существенно усиливать последствия, вызываемые ими (Hersbach et al., 2020). По определению ВМО, экстремальными считаются осадки, величина которых превышает 95-й или 99-й перцентиль климатической нормы для данного региона и времени года (WMO, 2021). Однако, такое определение не учитывает продолжительность периода, в течение которого выпадали осадки, что также очень важно для последствий, вызываемых ими. Часто причиной крупных наводнений бывают осадки не очень высокой интенсивности, но выпадающие в течение длительного времени, как это, например, было при катастрофических наводнениях на Дальнем Востоке в 2013 году и на Алтае в 2014 году. Таким образом, при анализе экстремальных осадков необходимо учитывать не только их абсолютную величину, но и длительность их выпадения. В связи с глобальным потеплением повторяемость и интенсивность экстремальных осадков увеличивается повсеместно, особенно в тропических и умеренных широтах (IPCC, 2021). Сильные снегопады также относятся к аномальным осадкам, и они могут стать причиной значительных проблем с электроснабжением и транспортом в крупных городах. Несмотря на общее потепление климата, снегопады в некоторых регионах усиливаются за счёт повышения влажности воздуха (Cohen et al., 2020). Дефицит осадков также относится к экстремальным событиям, вызывая засухи. Существует несколько типов засух. Метеорологическая засуха определяется как продолжительный период с уровнем осадков ниже климатической нормы. При агрометеорологической засухе дефицит осадков сопровождается дефицитом влаги в почве, мешающим нормальному развитию сельскохозяйственных культур. Гидрологическая засуха определяется по значительному снижению уровня воды в гидрологических объектах. В связи с глобальным потеплением частота и продолжительность засух, особенно в регионах, уже подверженных нехватке влаги, будет существенно увеличиваться, что делает засухи, наряду с волнами тепла, одним из наиболее опасных климатических рисков.

Аномально *высокие скорости ветра* также относятся к экстремальным климатическим событиям. Усиление скорости ветра связано с развитием мощных атмосферных вихрей, имеющих разные пространственные масштабы. Крупномасштабные вихри – ураганы или тропические циклоны, формирующиеся над теплыми океанами и сопровождающиеся ветром со скоростью более 33 м/с, сопровождаются сильными осадками и штормовым предельным уровнем моря. Тропические циклоны относятся к наиболее разрушительным типам экстремальных погодных событий. По данным IPCC (IPCC, 2021), частота мощных ураганов категории 4-5 по шкале Саффира-

Симпсона значительно возросла за последние десятилетия, особенно в Атлантическом бассейне. В локализованных в пространстве мезомасштабных интенсивных вихрях, смерчах или торнадо, скорости ветра могут превышать 100 м/с. Смерчи обладают огромной разрушительной силой. Они чаще встречаются в средних широтах, особенно в Северной Америке, но могут возникать и в других регионах, включая Европу и Россию (Doswell et al., 2001, Chernokulsky et al., 2020; 2022).

В последнее время большое внимание также стало уделяться так называемым комплексным событиям (*compound events*). Это экстремальные события, происходящие как результат взаимодействия нескольких компонентов и проявляющиеся в отклонении от нормы разных характеристик одновременно, что приводит к катастрофическим последствиям. Лесные пожары, существенно усиливающиеся с потеплением климата, возникают на фоне повышенной температуры, длительного отсутствия осадков и особенно быстро распространяются при высоких скоростях ветра. Паводки также становятся всё более частыми из-за увеличения интенсивности экстремальных осадков, ускоренного таяния снега и подъёма уровня рек. Особенно опасны паводки в прибрежных районах (IPCC, 2021), где ко всем перечисленным факторам добавляются нагоны морской воды в устья рек, вызванные сильным ветром. Отметим, что в практике деятельности Росгидромета наряду с понятием опасного явления (ОЯ) существует понятие Комплекса неблагоприятных явлений – сочетания двух и более одновременно наблюдающихся метеорологических явлений, каждое из которых по интенсивности (силе) не достигает критериев ОЯ, но близко к ним и может наносить ущерб не меньших размеров, чем ОЯ.

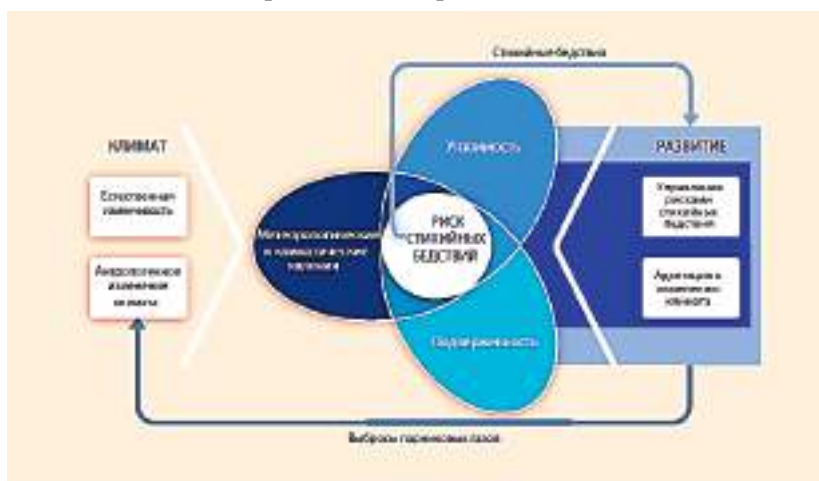
Кроме перечисленных типов экстремальных климатических событий, в связи с глобальным потеплением климата необходимо также отметить риски, связанные с таянием вечной мерзлоты. Примерно 65% территории Российской Федерации занято многолетнемерзлыми породами. Уменьшение слоя *вечной мерзлоты* нельзя формально отнести к экстремальным климатическим событиям, так как этот процесс происходит непрерывно. Однако, риски, связанные с этим процессом, очень существенны. Деграция вечной мерзлоты приводит к разрушению инфраструктуры на севере России, Канады и Аляски и высвобождению метана, содержащегося в ней (Anisimov et al., 2017, Anisimov, Zimov, 2020). По оценкам Международной арктической программы, к 2100 году может растаять до 70% верхнего слоя вечной мерзлоты (Smith et al., 2022).

Учитывая все возрастающие риски, связанные с увеличением числа экстремальных событий, их определению и классификации уделяется большое внимание. Важными официальными документами МГЭИК, определяющими понятия экстремальных погодных и климатических событий и их взаимосвязь с происходящими в климатической системе процессами, в первую очередь, носящими антропогенный характер, являются: специальный доклад МГЭИК по управлению рисками экстремальных событий и бедствий для содействия адаптации к изменению климата (2012 год) (СДЭБ МГЭИК), Пятый Оценочный доклад МГЭИК (2013 год) (ОД5 МГЭИК) и Шестой Оценочный доклад

---

МГЭИК (2021 год) (ОД6 МГЭИК). В настоящее время идет работа над Седьмым Оценочным докладом МГЭИК, который планируется к выпуску в 2028 году и где экстремальным климатическим событиям и их региональным проявлениям в настоящем и будущем будет посвящено две отдельных главы.

Как отмечается в ряде публикаций, в том числе в СДЭБ МГЭИК, характер и серьезность последствий экстремальных климатических явлений зависят не только от самих этих явлений, но также и от факторов подверженности и уязвимости социальных или экономических структур. Неблагоприятные последствия экстремальных явлений считаются бедствиями в тех случаях, когда они вызывают широкомасштабный ущерб и приводят к резким изменениям в нормальном функционировании каких-либо сообществ или общества в целом. На климатические экстремальные явления и степени подверженности и уязвимости влияет широкий спектр факторов, включая изменение климата в результате деятельности человека, естественную изменчивость климата и социально-экономическое развитие. Управление рисками стихийных бедствий и адаптация к изменению климата, как отмечается в СДЭБ МГЭИК, направлены, главным образом, как на снижение подверженности и уязвимости, так и на повышение сопротивляемости потенциальным неблагоприятным последствиям экстремальных климатических явлений, даже тогда, когда полностью исключить риск невозможно. Схема взаимодействия метеорологических и климатических явлений, подверженных климатическим изменениям и уязвимости социальных и экономических структур, формирующих риск стихийных бедствий, приводится на рис. 1.



**Рисунок 1.** Иллюстрация основных понятий СДЭБ. Схема взаимодействия метеорологических и климатических явлений, подверженных климатическим изменениям и уязвимости социальных и экономических структур, формирующих риск стихийных бедствий (IPCC, 2012)

**Figure 1.** Illustration of the key concepts of disaster risk. Diagram of the interaction between meteorological and climatic phenomena influenced by climate change and the vulnerability of social and economic systems that together shape disaster risk (IPCC, 2012)

ОД5 МГЭИК (IPCC, 2013), обращаясь к проблеме изменения частоты и интенсивности экстремальных явлений, в своих выводах отметил, что изме-

нения во многих экстремальных метеорологических и климатических явлениях наблюдаются приблизительно с 1950 г. В большинстве выводов, касающихся изменений экстремальных климатических событий, дается средняя степень достоверности и уверенности в описываемых изменениях. В ОД5 указано, что весьма вероятно, что в глобальном масштабе число холодных дней и ночей снизилось, а число теплых дней и ночей увеличилось. Вероятно, что повторяемость волн тепла возросла на значительной части территории Европы, Азии и Австралии. Вероятно, насчитывается большее число участков суши, где увеличилось количество случаев выпадения сильных осадков, чем участков, где количество таких случаев уменьшилось. Повторяемость и интенсивность сильных осадков, вероятно, увеличились в Северной Америке и Европе. На других континентах степень достоверности изменений, касающихся выпадения сильных осадков, в лучшем случае, средняя.

ОД6 МГЭИК (IPCC, 2021), рассматривая проблему роста частоты и интенсивности экстремальных явлений и опираясь на более точные данные наблюдений и результаты климатического моделирования, отмечает, что антропогенное изменение климата безусловно влияет на многие метеорологические и климатические экстремальные события во всех регионах земного шара. Доказательства наблюдаемых изменений в экстремальных событиях, таких, как волны жары, сильные осадки, засухи и тропические циклоны, и, объяснение их причин антропогенным воздействием стали более убедительными по сравнению с предыдущим, Пятым оценочным докладом МГЭИК. Частота и интенсивность сильных осадков увеличилась с 1950-х годов на большей части территории суши, и, вероятно (по шкале оценок достоверности выводов, принятой в МГЭИК), что основным движущим фактором является антропогенное изменение климата.

### ***Климатические нормы***

Так как экстремальные события – это явления, существенно отличающиеся от климатической нормы, то для их достоверного определения очень важным является понятие климатической нормы. Под климатической нормой понимается та или иная характеристика климата, статистически полученная из многолетнего ряда значений метеовеличины, чаще всего средняя многолетняя величина.

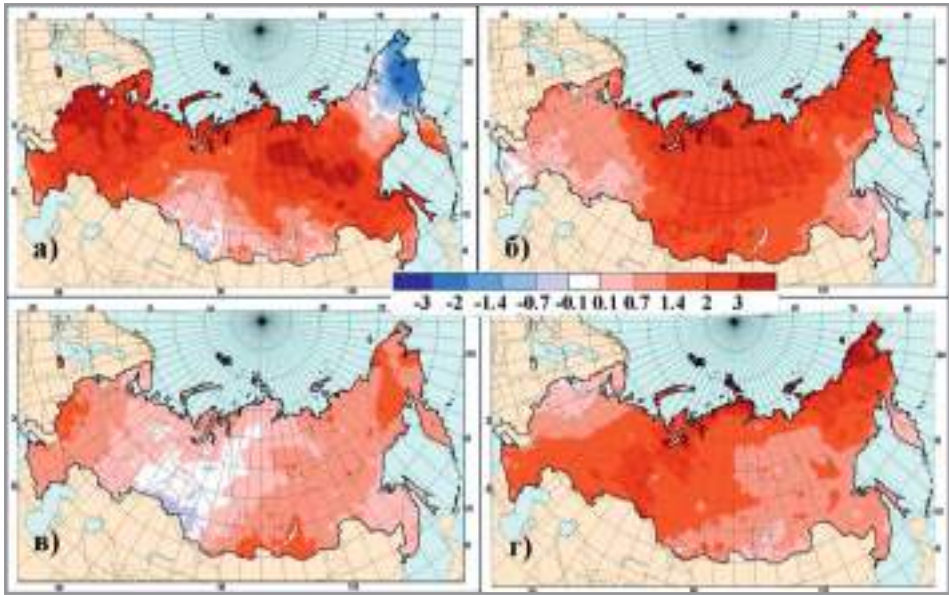
Согласно регламенту ВМО (ВМО-№ 1203, 2017), период осреднения для получения норм должен составлять 30 лет, хотя допускаются объективные пропуски данных до 20%. По решению 16-й сессии Комиссии по климатологии ВМО (см., например, ВМО-№ 1203, 2017) было рекомендовано для долгосрочной оценки изменчивости и изменения климата использовать период 1961-1990 гг. в качестве стабильного базового периода ВМО и для этих целей нормы пересчитывать за неперекрывающиеся 30-летние периоды. Для целей мониторинга климата и оперативной оценки аномальности текущей погоды рекомендовано использовать климатологические стандартные нормы, которые должны обновляться каждые десять лет (WMO-№ 1137, 2014). Во ВНИИГМИ-МЦД, по заданию Росгидромета, нормы основных климатических параметров

---

(температуры воздуха, осадков, упругости водяного пара, атмосферного давления на уровне моря) на территории России рассчитывались за три 30-летних периода с шагом в 10 лет: 1961-1990, 1971-2000 и 1981-2010 гг. После завершения второго десятилетия XXI века встал вопрос о том, что использование климатических норм периода 1961-1990 как стабильного базового периода ВМО уже не отражает ставшие очевидными наблюдаемые изменения климата. Использование норм 1961-1990 г. так же, как и норм 1971-2000 и 1981-2010 гг., при этом не соответствует задачам мониторинга климата и оперативной оценки его аномальности. Семнадцатый Всемирный метеорологический конгресс (КГ-17) в 2015 г. в резолюции 16 (КГ-17) «Отчет шестнадцатой сессии Комиссии по климатологии» (см., например, ВМО-№ 1157, 2015) постановил усовершенствовать определение климатологической стандартной нормы. Климатологическая стандартная норма теперь обозначается как последний 30-летний период, который завершается годом, кончающимся нулем (1981-2010, 1991-2020 и т.д.). ВМО была поставлена перед национальными метеослужбами проблема подготовки новых климатических норм периода 1991-2020 гг. Вопрос подготовки и введения новых климатических норм стал предметом обсуждения не только в кругах научной общественности, но и широко освещался в СМИ. Ожидалось, что использование новых климатических норм при наблюдающихся тенденциях изменения климата и увеличивающейся климатической изменчивости уменьшит оценки степени аномальности отдельных компонентов климатической системы и будет иметь практическое использование в задачах прикладной климатологии. В ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» в соответствии с заданием Росгидромета был проведен расчет климатических норм нового тридцатилетнего периода 1991-2020 гг. основных климатических параметров (температуры воздуха, осадков, упругости водяного пара, атмосферного давления на уровне моря) на территории России. Особенности изменений норм перечисленных метеовеличин для территории России за 1991-2020 год, в сравнении с нормами предыдущих тридцатилетних периодов 1961-1990 и 1981-2010 гг., следующих с шагом 10 лет, анализировались в статье (Коршунова, Швець, 2023). На рис. 2 показаны карты разностей между нормами температуры за тридцатилетние периоды: 1991-2020 и 1961-1990 для территории России по четырем центральным месяцам сезонов. Наибольшие увеличения норм температуры за период 1991-2020, по сравнению с периодом 1961-1990, отмечаются для зимнего сезона. При этом практически на всей ЕТР это увеличение составляет от  $1.5^{\circ}$  до  $3.0^{\circ}\text{C}$ , а на большинстве территорий северо-запада и севера ЕТР увеличение январских норм даже превосходит  $3.0^{\circ}\text{C}$ . Сформированный в районах Чукотки и севера Камчатского края очаг отрицательных значений разностей январских норм для рассмотренных на рис. 2 периодов может быть связан с тем, что пик потепления в этом регионе пришелся именно на период 1961-1990. Для разностей норм периодов 1991-2020 и 1981-2010 указанный очаг уже не наблюдается.

На рис. 3 показано различие статистических характеристик рядов по температуре воздуха при расчетах климатических норм для базовых периодов 1961-1990 и 1991-2020 гг. для метеостанции Москва, ВДНХ, для центральных меся-

цев сезонов. Для всех месяцев наблюдается увеличение значений климатической нормы за период с 1991 по 2020 годы по сравнению с предыдущим 30-летним периодом в среднем на 1°C. При этом в январе различия достигают 4°C.

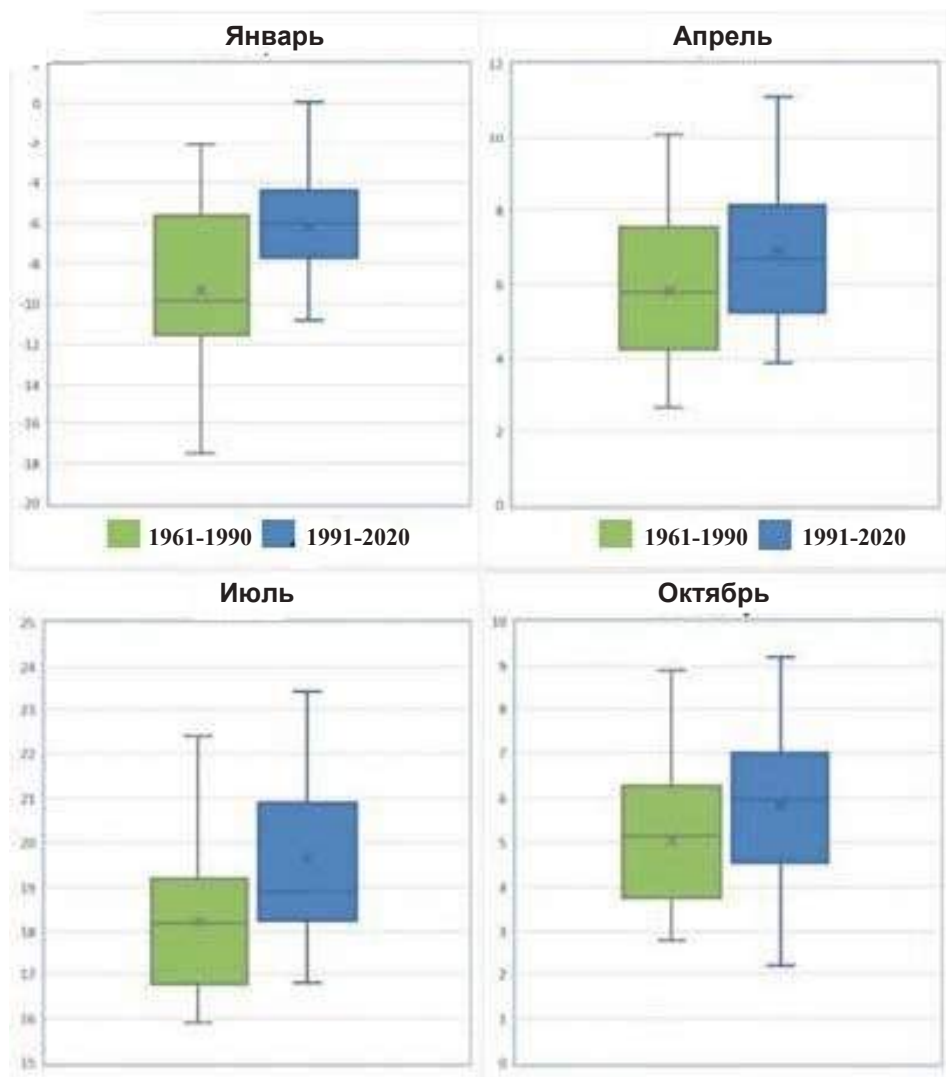


**Рисунок 2.** Разность норм (°C) 1991-2020 и 1961-1990 гг. по температуре воздуха на территории России в центральные месяцы сезонов: январь (а); апрель (б); июль (в); октябрь (г)  
*Источник: Коришнуова, Швецъ, 2023*

**Figure 2.** Difference between the 1991-2020 and 1961-1990 climatological normals (°C) of air temperature across the territory of Russia in the central months of the seasons: January (a); April (b); July (c); October (d)  
*Source: Korshunova, Shvets, 2023*

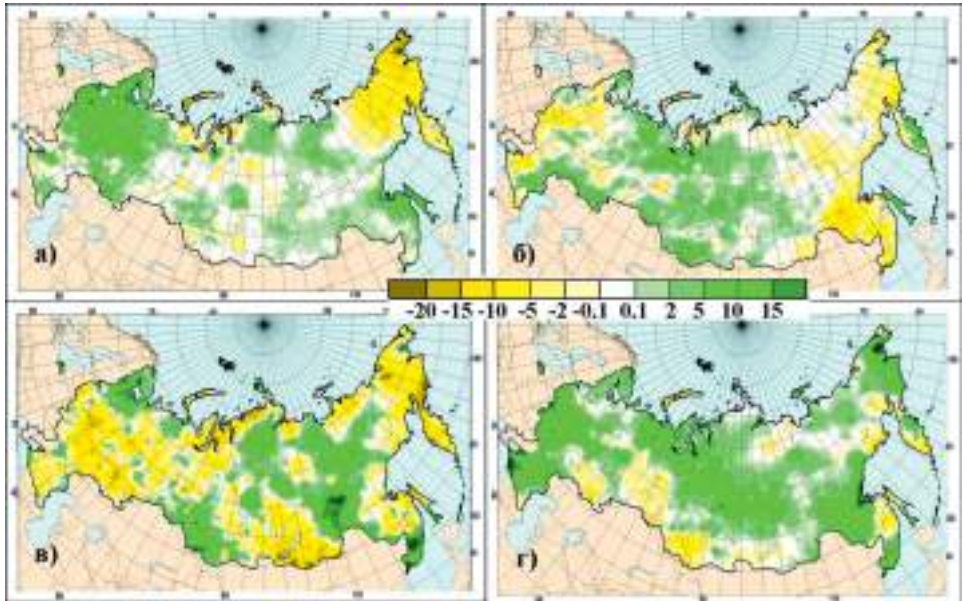
Рис. 4 демонстрирует разность норм 1991-2020 и 1961-1990 гг. по осадкам на территории России в центральные месяцы сезонов в мм. Для большей части территории России средние значения осадков, показывающие климатическую норму за период с 1991 по 2020 гг., зимой, весной и осенью увеличилось на 5-15 мм по отношению к предыдущему периоду. При этом летние нормы по осадкам уменьшились на большей части страны на 10-15 мм, однако значительное увеличение летних осадков наблюдается в южных районах Якутии, Амурской области и в Приморье (до 20-25 мм).

Приказом Росгидромета от 18.02.2022 № 64 с 15 марта 2022 г. климатические нормы, рассчитанные ФГБУ «ВНИИМГМИ-МЦД» за период 1991-2020 гг., по 7 метеорологическим параметрам (среднемесячная температура воздуха, среднемесячная сумма осадков, среднемесячное число дней с осадками более 1 мм, среднемесячная упругость водяного пара, среднемесячное атмосферное давление на уровне станции, среднемесячное атмосферное давление на уровне моря, среднемесячная продолжительность солнечного сияния) введены в оперативно-производственную деятельность подведомственных учреждений Росгидромета.



**Рисунок 3.** Различия статистических характеристик рядов по температуре воздуха (°C) при расчетах климатических норм для базовых периодов 1961-1990 и 1991-2020 гг. для метеостанции Москва, ВДНХ  
*Источник: Коршунова, Швець, 2023*

**Figure 3.** Differences in the statistical characteristics of air temperature time series (°C) calculated for the climatological base periods 1961-1990 and 1991-2020 at the Moscow (VDNKh) meteorological station  
*Source: Korshunova, Shvets, 2023*



**Рисунок 4.** Разность норм 1991-2020 и 1961-1990 гг. по осадкам на территории России в центральные месяцы сезонов: январь (а); апрель (б); июль (в); октябрь (г) (мм)  
*Источник: Коршунова, Швець, 2023*

**Figure 4.** Difference between the 1991-2020 and 1961-1990 climatological normals of precipitation (mm) across the territory of Russia in the central months of the seasons: January (a); April (b); July (c); October (d)  
*Source: Korshunova, Shvets, 2023*

### Индексы экстремальности

На практике для оценки экстремальных событий часто используют индексы экстремальности климата (или индексы экстремальных условий), которые количественно описывают отклонения климата от климатической нормы и позволяют определить частоту, интенсивность и продолжительность экстремальных погодных явлений. Для оценки последствий экстремальных событий и анализа климатических рисков применяют так называемые факторы климатического воздействия (Climate Impact Drivers – CID). Факторы климатического воздействия (в ряде изданий называемые индексами влияния) – это особые физические климатические условия, такие как экстремальная жара или обильные осадки, которые напрямую влияют на человеческое общество и экосистемы. Величины обоих этих типов индексов имеют решающее значение для понимания климатических рисков.

Перечень существующих климатических индексов включает не менее нескольких тысяч различных индексов, относящихся к характеристикам разных природных явлений, разным сферам человеческой деятельности, разным отраслям экономики, разным региональным особенностям климата, разным национальным приоритетам стран, и т.д. Даже классификация климатических

индексов весьма затруднительна. Широкий перечень климатологических индексов приводится в Главах 11 и 12 в интерактивном климатическом Атласе и в Приложении VI первого тома ОДб МГЭИК, где для температуры представлено 20 индексов, для осадков 13 индексов и для засух 8 индексов. В ОДб МГЭИК климатические индексы разделены на две категории: индексы экстремальности климата и индексы, представляющие численные оценки климатического воздействия на общество и экосистемы. Индексы для оценки климатических воздействий в ОДб МГЭИК классифицированы на семь типов: жара и холод, влажный и сухой климат, ветер, снег и лед, прибрежные условия, открытый океан и тип «другие».

Имеются и другие перечни климатических индексов, получившие официальный статус на международном уровне. Так, Совместной группой экспертов Комиссий по климатологии, морской метеорологии ВМО и КЛИВАР по обнаружению и индексам изменения климата (ETCCDI, <http://www.clivar.org/organization/etccdi/etccdi.php>) был выработан базовый перечень описательных индексов экстремумов (Guidelines on Analysis of extremes, 2009), насчитывающий 16 индексов для экстремумов приземной температуры воздуха: TN – минимальной суточной и TX – максимальной суточной температур. Для суточных сумм осадков R в базовом перечне ETCCDI используются 11 индексов. При этом в расчетах индексов ETCCDI все еще рассматривается базовый период наблюдений как 1961-1990 гг. Особенности индексов экстремумов температуры указанного перечня ETCCDI обсуждаются, например, в статье Круглова и соавт. (2019).

Индексы обоих типов, при всем многообразии принципов их построения, могут иметь в основе использование как абсолютных значений тех или иных метеовеличин, так и относительных значений метеовеличин, характеризующих их особенности для конкретной географической местности (например, конкретной точки наблюдения или для конкретной территории) и для конкретного временного отсчета (например, месяца или сезона) в сравнении с соответствующими климатическими нормами.

Для расчетов индексов с относительными значениями метеовеличин может быть поставлена и решена задача восстановления плотности вероятности метеовеличин по имеющимся эмпирическим данным на основе проверки гипотез о соответствии эмпирического распределения некоторому известному типу распределений с последующей оценкой параметров этого типа распределений и оценкой соответствия между эмпирическими и теоретическими значениями квантилей. Квантиль случайной величины, соответствующий некоторому значению  $t$  от 0 до 1 – значение, которое заданная случайная величина не превышает с фиксированной вероятностью  $t$ . Если вероятность задана в процентах, то квантиль называется процентилем или перцентилем. Примерами квантилей являются значения случайной величины, которым соответствует  $t = 0.25$  (первая квартиль),  $t = 0.50$  (медиана, или вторая квартиль),  $t = 0.75$  (третья квартиль). Квантиль, рассчитываемая по эмпирическим данным – выборке значений некоторой случайной величины, для произвольного  $t$  от 0 до 1 – свободна от предположений о типах распределений. Для

таких свободных от предположений о типах и параметрах распределений оценок при анализе экстремальности климата обычно рассматриваются квантили, соответствующие правому и левому «хвостам» кривых плотности вероятности распределений метеовеличин (т.е. для значений  $t$ , близких к 0 и к 1, соответственно). Так, в перечне индексов ETCCDI из 16 индексов экстремальности температуры 7 индексов ориентированы на использование квантилей значений суточных минимальной и максимальной температур, а из 11 индексов экстремальности осадков для 2-х индексов вычисляются квантили для суточных сумм осадков. В многочисленных публикациях по оценкам экстремальности климата могут варьировать как обозначения индексов экстремальности, так и способы расчета этих индексов. При этом имеют место некоторые отличия названий индексов и способов их расчетов от принятых в официальных изданиях МГЭИК, ВМО, изданиях проекта КЛИВАР (CLIVAR). Однако наименования и особенности расчетов индексов экстремальности, как правило, детально описаны в соответствующих источниках.

### Квантильная регрессия

Помимо численного определения экстремального события, очень важным является оценка изменений, происходящих с данным событием во времени, то есть оценка трендов. Для задач оценки состояния и изменений природной среды вполне распространённой является ситуация, когда имеет место статистическая зависимость соответствующих конкретным  $t$  квантилей некоторой характеристики природной среды – метеовеличины  $Y$  (предиктанта) от изменений переменных, выполняющих роль предикторов. С учетом широкого применения в климатологии индексов, расчеты которых проводятся с использованием квантилей, могут быть поставлены задачи расчетов условных, зависящих от предикторов климатических индексов для произвольных  $t$  от 0 до 1. Для решения таких задач, как и для некоторых других задач анализа гидрометеорологических данных, целесообразно использовать метод квантильной регрессии (МКР). Интерес к квантилям в настоящее время возрастает в связи с необходимостью анализировать свойства «хвостов» распределений метеовеличин, в том числе тогда, когда предположения о семействах распределений метеовеличин представляются затруднительными, либо когда самые крупные аномалии метеовеличин подчиняются иным, чем основная масса значений, распределениям (Талев, 2024). Последнее, в свою очередь, важно для исследования свойств метеовеличин, близких к экстремальным и относимых к наиболее опасным проявлениям метеорологических явлений, например, Кислов и др. (2021), Kislov, Matveeva (2016).

С использованием МКР может решаться задача расчета климатических трендов, когда в качестве предикторов рассматривается временная характеристика, например, порядковый номер временного отсчета. Традиционно применяемые в климатологии оценки климатических трендов, основанные на методе наименьших квадратов (МНК), позволяют оценивать долгопериодные тенденции изменения лишь условного (в зависимости от  $X$ ) математического

---

ожидания предиктанта  $Y E(Y/X)$  в зависимости от предикторов  $X$ . Метод МКР (Koenker, Bassett, 1978) – это робастный непараметрический инструментарий регрессионного анализа, дающий оценки значений коэффициента регрессии для произвольной в интервале от нуля до единицы величины квантиля  $\tau$  ( $0 < \tau < 1$ ) значений предиктанта  $Y$ .

В ходе анализа трендов с использованием МКР обычно строятся зависимости значений климатического тренда от величины квантиля из интервала от нуля до единицы, называемые процесс-диаграммами и представляющие детализированный по значениям квантиля тренд. Результаты такого анализа опубликованы в ряде работ, причем первые появившиеся работы описывали результаты анализа трендов для приземной температуры воздуха (Fan, 2014; Gao, Franzke, 2017; Naugen et al., 2019; Стерин, Тимофеев, 2016). Наряду с анализом трендов температуры, метод квантильной регрессии находит широкое применение при анализе пространственных и временных особенностей режима осадков, в том числе трендов экстремально высоких значений осадков и вызываемых при этом соответствующих опасных явлениях (Xuan, Sertac, 2021; Salam et al., 2019; Bhikhari, Nirajan, 2020; Zheng et al., 2016; Passow, Donner, 2019; Lausier, Shaleen, 2018). В то же время достаточно широкое распространение получили работы по анализу с помощью метода квантильной регрессии режима засух (Xuan et al., 2011; Cannon et al., 2015).

## **Часть 2. Глобальные тенденции изменения экстремальных климатических событий**

### ***Температурные аномалии: волны жары***

Согласно Шестому оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (ОД6 МГЭИК, IPCC, 2021), антропогенное изменение климата увеличило частоту и интенсивность волн жары начиная с 1950-х годов, а дальнейшее потепление ещё больше увеличит их частоту и интенсивность. При этом увеличилась вероятность возникновения *compound events*, сочетающих одновременное возникновение волн жары и засух в глобальном масштабе.

С каждым следующим увеличением глобальной температуры изменения в экстремальных явлениях становятся всё более значительными. Например, каждые дополнительные  $0.5^{\circ}\text{C}$  глобального потепления приводят к заметному увеличению интенсивности и частоты экстремальных температур, включая интенсивность, частоту и продолжительность волн жары. В работе (Dosio et al., 2018), вышедшей в преддверии публикации Специального доклада МГЭИК о последствиях глобального потепления на  $1.5^{\circ}\text{C}$ , проводится сопоставление характеристик возможных волн жары и их влияния на различные аспекты жизни человечества при двух вариантах повышения глобальной температуры, а именно: при повышении на  $1.5^{\circ}\text{C}$  и на  $2.0^{\circ}\text{C}$ . Показано, что при потеплении на  $1.5^{\circ}\text{C}$  13.8% населения мира по крайней мере один раз в каждые пять лет будут подвергаться воздействию сильных волн жары. Предпола-

гается, что эта доля увеличивается почти в три раза (36.9%) при потеплении на 2°C, то есть эта разница составит около 1.7 миллиарда человек.

Как указывается в материалах ОД6 МГЭИК, волны жары усиливают воздействие засухи, усиливают лесные пожары, увеличивают количество опасного дыма, приводят к нехватке воды, дефициту электроэнергии и сельскохозяйственным потерям, что наносит значительный ущерб сообществам по всему миру. В глобальном масштабе воздействие волн жары на население будет продолжать расти по мере дальнейшего потепления, при этом существенные географические различия в смертности, связанной с жарой, затрагивают тех, кто имеет наименьшие материальные ресурсы и не предпринимает дополнительные меры адаптационного характера. Повышение температуры и, как следствие, увеличение интенсивности и повторяемости волн жары приводят к росту смертности и заболеваемости, причем последствия варьируются в зависимости от возраста, пола, степени урбанизации и социально-экономических факторов. К высоко уязвимым группам, испытывающим последствия для здоровья от теплового стресса, относятся все, кто занимается физическим трудом на открытом воздухе (например, строительство, сельское хозяйство). Потенциальное количество потерянных рабочих часов из-за жары значительно увеличилось за последние два десятилетия. Некоторые регионы уже испытывают тепловой стресс, достигающий или приближающийся к верхнему пределу производительности труда. Волны жары в городах часто усугубляются эффектом «городского острова тепла». Быстрая урбанизация и отсутствие климатически-чувствительного городского планирования, а также сохраняющиеся угрозы, связанные с городскими островами тепла, повышают уязвимость маргинализированного городского населения и ключевой городской инфраструктуры к изменению климата. Волны жары увеличивают риски для продовольственной безопасности в уязвимых регионах. Потери популяций местных растений и животных широко распространены, и они во многом связаны со значительным повышением самых высоких годовых температур и периодами сильной жары. Прогнозируется, что количество и распространение вредителей, сорняков и болезней сельхозкультур увеличится в связи с глобальным потеплением, которое усугубится экстремальными явлениями, вызванными изменением климата (например, засухами, наводнениями, волнами тепла и лесными пожарами), что будет иметь негативные последствия для здоровья экосистем, продовольственной безопасности, здоровья человека и источников средств к существованию. Прогнозируется, что будущие изменения климата усилят воздействие на антропогенные системы и на региональные различия.

Хотя универсального определения волн жары (волн тепла), несмотря на высокую значимость этого явления, нет, тепловые волны обычно описываются как последовательный период жарких дней с температурами выше заданного порогового значения. Пороговое значение температур часто основано на процентиле ежемесячных суточных температур или на фиксированном значении температуры. Здесь уместно отметить, что периодом жары (часто в англоязычной литературе называемом *warm spell*), следует считать

---

период, соответствующий необычно высоким температурам, даже если они сами по себе не являются экстремально высокими (например, 5-дневное событие зимой со средней температурой  $+5^{\circ}\text{C}$  в регионе, где основанная на долгосрочной климатологии средняя оценка температуры для дат этого события составляет минус  $5^{\circ}\text{C}$ , следует считать волной тепла). Другой подход к определению волн жары учитывает степень их воздействия на людей и природные экосистемы. Сильные, экстремальные волны жары, такие как те, что наблюдались на Балканах (2007 г.), во Франции (2003 г.) или в России (2010 г.), связаны с ростом смертности, дискомфортом для людей и снижением производительности труда. В многочисленных источниках волны жары последних десятилетий характеризуются как одно из самых смертоносных стихийных бедствий в некоторых регионах и признаны «тихими убийцами», имеющими заметные социальные и экономические последствия, начиная от повреждения инфраструктуры, нагрузки на подразделения экстренного реагирования и больницы и до перегрузки и выхода из строя электросетей и других элементов энергоснабжения, паралича железнодорожных и воздушных транспортных систем. Другие негативные последствия волн жары включают снижение трудоспособности и производительности труда, урожайности, продуктивности скота. При этом масштабы таких последствий во многом зависят от готовности общества реагировать на экстремальные явления.

Всесторонний обзор традиционных определений волн жары и описание набора инструментов для расчета их характеристик приводится, например, в (Raei et al., 2018). В качестве инструментария там рассматривается т.н. GHWR – Global Heatwave and Warm-Spell Data Record and Analysis Toolbox. Как отмечается в указанном источнике, комплексный анализ волн жары должен учитывать четыре ключевые характеристики таких событий, а именно: интенсивность, продолжительность, частоту и пространственный охват территории. Методологии идентификации волн жары различны. Следуя классификации методов определения волн жары, использованной в (Raei et al., 2018), выделяются пять общих категорий таких методов.

Подход с постоянным пороговым значением температуры определяет волну жары как событие, во время которого температура превышает некоторый постоянный порог в течение длительного периода времени. Это может быть последовательность от 2 до 10 и более дней, при выборе порогового значения температуры могут рассматриваться максимальная, минимальная или средняя суточная температура. Инструментарий GHWR предоставляет различные глобальные данные о волнах жары, используя различные комбинации температурного порога и продолжительности для ежедневных максимальных, минимальных и средних температурных наблюдений (например, все 5-дневные события волн жары с суточной максимальной температурой более  $35^{\circ}\text{C}$ ).

В подходе с использованием порогового значения температуры, полученного с помощью функции распределения температур, пороговые значения температуры для волн жары назначаются в соответствии с локальной климатологией. Например, события, во время которых значения температуры превышают локализованный порог (например, 90-ю перцентиль) в течение

нескольких последовательных дней, определяются как волны жары. Инструментарий GHWR предоставляет информацию о волнах жары и периодах потепления на основе различных пороговых значений, полученных с помощью функции распределения температур, используя локализованные ежедневные максимальные, минимальные и средние температуры.

При использовании порогового значения, полученного для летнего (теплого) сезона, локализуется температурный порог как в пространстве, так и во времени. Более подробно, температурные пороги для каждого календарного дня и каждой сетки указываются как верхний порог (75-й, 80-й, 85-й, 90-й, 95-й процентиля) функции распределения вероятностей (ФРВ), построенной на основе многолетних суточных данных температуры за период в 15 (или 21) дней, и центрированных вокруг интересующего календарного дня. Временная локализация в этом подходе позволяет обнаруживать периоды потепления (например, необычно теплую зиму), а также волны жары.

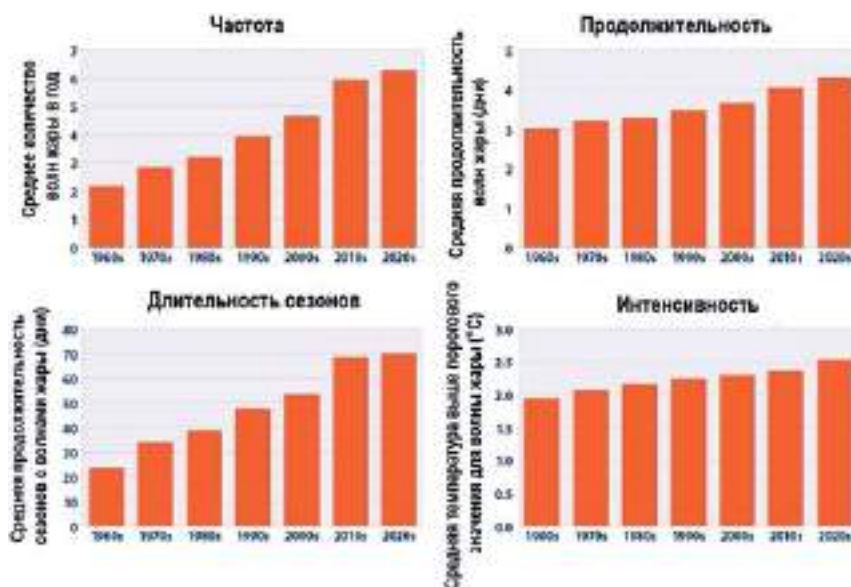
В качестве одной из реализаций для идентификации волн жары может рассматриваться расчет, когда пространственно локализуется температурный порог для волн жары и назначается верхний порог (75-й, 80-й, 85-й, 90-й, 95-й процентиля) ФРВ, построенной на основе долгосрочных ежедневных летних (теплого сезона) температур в каждом узле сетки. Этот подход концептуально аналогичен пороговому значению, полученному из ФРВ, но использует только данные за летний период (теплый сезон) и не учитывает пороговые значения, локализованные во времени. Такое определение волн жары больше подходит для исследований, рассматривающих экстремальную жару и ее влияние на смертность, урожайность и т.д. При реализации расчетов на основе такого подхода в инструментарии GHWR также используются ежедневные максимальные, минимальные и средние наблюдаемые температуры и различные варианты продолжительности волн жары (2, 3, 4, 5, 6, 7 и 10 последовательных дней).

Такие индексы, определяющие волны жары, как коэффициент избыточного тепла (EHF – Excess Heat Factor) и стандартизированный индекс тепла (SHI – Standardized Heat Index), вводятся с использованием несколько более сложных расчетов и достаточно детально разъясняются в Raei et al., (2018). Несмотря на значительную степень стандартизации представления явления, достигнутую за счет введения индекса SHI, следует учитывать, что волны жары сложны по своей природе и не могут быть просто сопоставлены по регионам, природным системам и целевым секторам. Однако все определения волн жары включают в себя по крайней мере одну переменную, определяющую температуру (суточный максимум, минимум или среднее значение), и предусматривают выполнение условия, что предопределенный порог превышен в течение ряда последовательных дней. Указание порога имеет первостепенное значение и зависит от приложения или целевой группы исследования (например, растения, люди, энергетический сектор). Даже незначительное изменение хотя бы одного из параметров определения тепловой волны может привести к значительному изменению предполагаемых последствий. Некоторые животные, например, чувствительны к определённому диапазону темпе-

---

ратур, а некоторые виды сельскохозяйственной продукции демонстрируют прямую реакцию на определённый температурный порог.

Большое количество исследований посвящено анализу изменений характеристик тепловых волн в глобальном масштабе и уточнению региональных особенностей их изменений. Как показывают результаты исследования динамики различных характеристик волн жары за последние несколько десятилетий, фактические данные для различных крупных территорий демонстрируют неуклонное возрастание таких характеристик, как частота, продолжительность и интенсивность волн жары, а также продолжительность периода года, когда имеют место эти явления. В качестве иллюстрации этого на рис. 5 показана динамика по десятилетиям основных характеристик волн жары для 50-ти крупнейших метрополий территории США. Эти процессы влияют на динамику смертности от сильной жары, что показано на рис. 6.

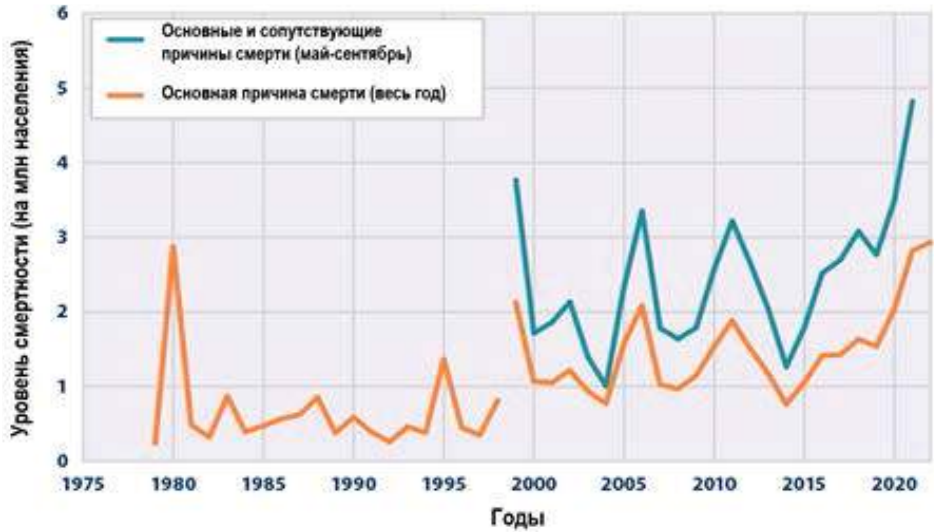


**Рисунок 5.** Динамика по десятилетиям основных характеристик волн жары для 50-ти крупнейших метрополий территории США, по данным Агентства по охране окружающей среды США (EPA)

Слева сверху: среднее число волн жары за год; справа сверху: средняя продолжительность индивидуальной волны жары (в днях); слева внизу: средняя продолжительность периода в году, когда наблюдаются волны жары (в днях). Этот показатель важен, т.к. волны жары, которые происходят раньше в весенний или позже в осенний периоды, могут застать людей врасплох и увеличить период подверженности рискам здоровья из-за волн жары. Справа внизу: средняя температура превышения локального порога для определения волны жары (°C). Локальный порог температур определяется как 85-я процентиль значений температуры.

Источник: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heat-waves>

**Figure 5.** Decadal trends in the main characteristics of heat waves for the 50 largest metropolitan areas in the United States (based on data from the U.S. Environmental Protection Agency, EPA) Top left: average number of heat waves per year. Top right: average duration of an individual heat wave (days). Bottom left: average length of the annual heat wave season (days). This indicator is important because heat waves occurring earlier in spring or later in autumn may catch people unprepared and extend the period of exposure to heat-related health risks. Bottom right: average temperature exceedance above the local threshold used to define a heat wave (°C). The local temperature threshold is defined as the 85th percentile of temperature values. Source: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heat-waves>



**Рисунок 6.** Динамика числа смертей на миллион населения в 50 крупных мегаполисах США от причин, включающих волны жары, по данным Агентства по охране окружающей среды США (EPA)

*Оранжевая кривая – волны жары считаются основной причиной смерти, голубая кривая – волны жары считаются основной и одной из дополнительных причин смерти*

*Источник: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heat-related-deaths>*

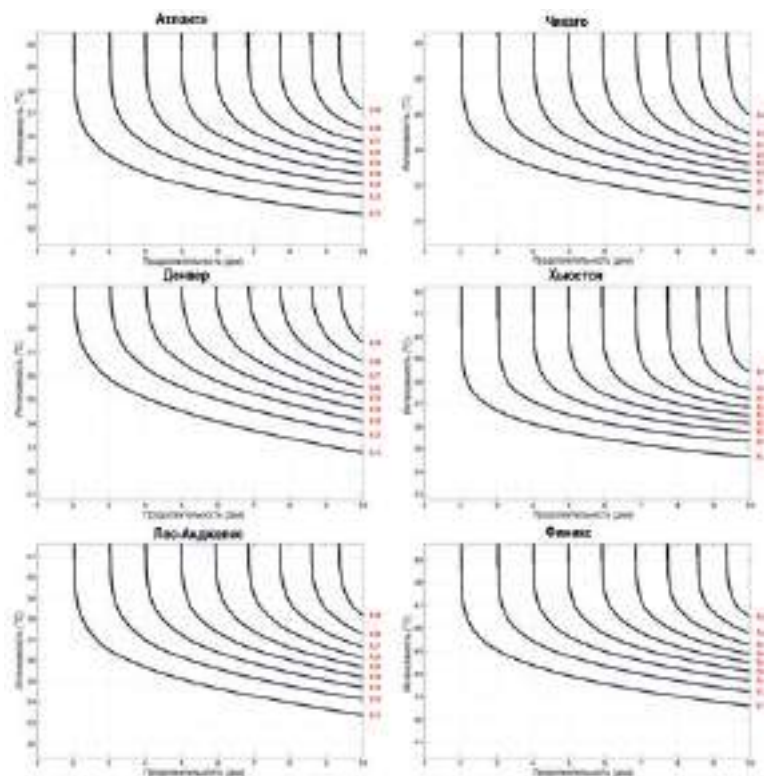
**Figure 6.** Trends in the number of deaths per million population in 50 major U.S. metropolitan areas attributable to causes involving heat waves (based on data from the U.S. Environmental Protection Agency, EPA)

*The orange curve represents cases in which heat waves are identified as the primary cause of death. The blue curve represents cases in which heat waves are identified as either the primary or a contributing cause of death*

*Source: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heat-related-deaths>*

Большинство исследований изучают различные характеристики волн жары в отдельности, но при этом не рассматривают взаимосвязи этих характеристик. Примерами таких характеристик волн жары являются самый жаркий день в последовательностях, рассматриваемых как волны, для каждого года (температура в градусах), или самая длинная продолжительность последовательных жарких дней, для которых температура превышает некоторый порог установленный (число дней). Однако текущие одномерные индикаторы волн жары часто недооценивают их воздействие, поскольку они не могут всесторонне охарактеризовать экстремальное явление. Влияние отдельных характеристик аномальной жары может быть усилено при одновременном рассмотрении нескольких характеристик (например, высокая интенсивность и длительная аномалия против высокой интенсивности и кратковременной аномалии). Совместному анализу характеристик аномальной жары посвящено несколько работ. В качестве примера рассмотрим представляющую интерес работу Mazdiyasi et al. (2019), где авторами предлагается и исследуется модель интенсивности-длительности-частоты волн жары (HIDF – Heatwave Intensity-Duration-Frequency). Эта модель несколько отличается от типичного определения волн жары, поскольку моделируется годовая вероятность появления после-

довательных жарких дней. HIDF позволяет получать вероятность появления (или соответствующий период повторяемости) годовых максимальных температур за период от одного до десяти дней. В модели HIDF используются многомерные копула-функции для связи продолжительности и интенсивности волн жары. Использование этих функций позволяет представлять информацию о частоте волн жары с различными сочетаниями интенсивности и продолжительности. В цитируемой работе рассматривается интенсивность волн как среднее значение среднесуточной температуры на протяжении всей продолжительности волн жары. При этом используются средние суточные температуры (вместо максимальной температуры) для учета ночного охлаждения или его отсутствия, поскольку кумулятивное воздействие высоких температур (например, отсутствие ночного охлаждения во время волн жары), – может быть пагубным для здоровья человека. Результаты первой части работы отображают и сравнивают кривые HIDF для шести городов США, используя данные о среднесуточной температуре за период с 1979 по 2016 год (рис. 7).

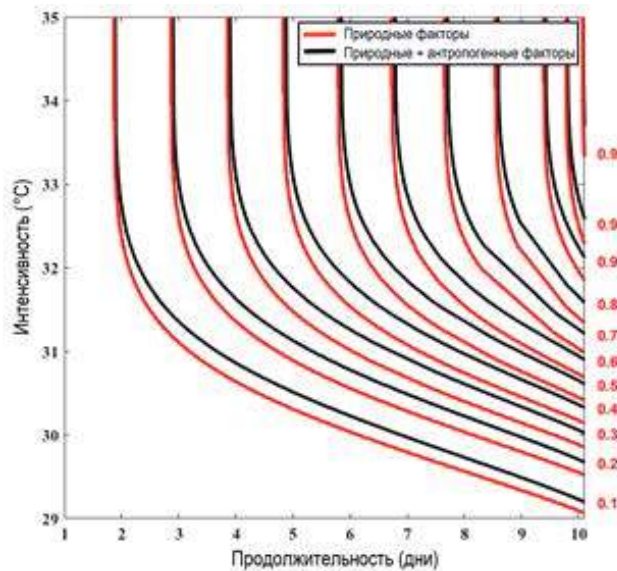


**Рисунок 7.** Кривые интенсивность – продолжительность – частота (HIDF) волн жары для шести крупных городов США

Левый столбец сверху вниз: Атланта, Денвер, Лос-Анджелес, правый столбец сверху вниз: Чикаго, Хьюстон, Феникс. Красным на правой вертикальной оси обозначены вероятности непревышения сочетания интенсивности и продолжительности  
Источник: Mazdiyasi et al., 2019

**Figure 7.** Heat wave intensity – duration – frequency (HIDF) curves for six major U.S. cities *Left column, from top to bottom: Atlanta, Denver, Los Angeles. Right column, from top to bottom: Chicago, Houston, Phoenix. The red scale on the right vertical axis indicates the non-exceedance probabilities of the combined intensity and duration values*  
Source: Mazdiyasi et al., 2019

Во второй части указанной работы сравниваются кривые HIDF (рис. 8), полученные на основе моделей за исторический период с учетом антропогенных выбросов, с моделями за тот же период, но учитывающими только естественный уровень выбросов (например, доиндустриальный уровень выбросов). В результате появляется возможность исследовать влияние антропогенных выбросов на характеристики экстремальных тепловых явлений, используя данные о среднесуточной температуре за период с 1850 по 2005 год. Используя этот подход, авторы одновременно сравнивают различия в интенсивности, продолжительности и частоте тепловых волн для более полного анализа влияния антропогенного изменения климата на волны тепла. При этом демонстрируется, что при фиксированных сочетаниях значений продолжительности и интенсивности волны жары вероятность достижения такого сочетания в условиях антропогенной эмиссии выше.



**Рисунок 8.** Кривые интенсивность – продолжительность – частота (HIDF) волн жары для мегаполиса Лос-Анджелес, США, по результатам моделирования группой моделей из перечня CMIP

*Черные кривые – с учетом фактического антропогенного воздействия. Красные кривые – с учетом только воздействия естественных факторов. Красным на правой вертикальной оси обозначены вероятности непревышения сочетания интенсивности и продолжительности*

*Источник: Mazdiyasi et al., 2019*

**Figure 8.** Heat wave intensity – duration – frequency (HIDF) curves for the Los Angeles metropolitan area, USA, based on simulations from a multi-model ensemble included in CMIP

*Black curves represent simulations that account for observed anthropogenic forcing. Red curves represent simulations that include only natural forcing. The red scale on the right vertical axis indicates the non-exceedance probabilities of the combined intensity and duration values*

*Source: Mazdiyasi et al., 2019*

### Экстремальные осадки

Увеличение интенсивности и повторяемости экстремальных осадков является одним из наиболее надёжно установленных трендов в современной

климатологии. Согласно отчёту IPCC AR6 (IPCC, 2021), на большей части суши с хорошим покрытием осадкомерными станциями выявлено достоверное увеличение как интенсивности, так и частоты экстремальных осадков. Интенсивность экстремальных осадков увеличивается в среднем примерно на 5-7% на каждый градус глобального потепления ( $^{\circ}\text{C}$ ), что находится в соответствии с термодинамическим механизмом изменения осадков. По уравнению Клаузиуса-Клапейрона с увеличением температуры атмосфера способна удерживать больше влаги и потенциально реализовать ее в виде осадков. При этом процесс осадкообразования во многом регулируется динамическим механизмом, определяемым циркуляционными особенностями и интенсивностью восходящих движений воздуха. При увеличении температуры не только общее влагосодержание атмосферы увеличивается, но также могут усиливаться вертикальные восходящие движения. Это способствует более мощной конвекции и образованию интенсивных осадков (Chernokulsky et al., 2018). Также происходит изменение и перераспределение атмосферных потоков влаги, атмосферных рек и фронтальных систем, связанных с внетропическими циклонами (Lopez-Marti et al., 2025). Частота экстремальных осадков, определенная как число дней с осадками выше 95-го или 99-го перцентиля, также увеличивается, но с более высокой региональной изменчивостью в зависимости от локальных условий циркуляции – в среднем на 3-10% на  $^{\circ}\text{C}$  (Sun et al., 2020). При этом в США наблюдается рост экстремальных осадков примерно на 6-8% на  $^{\circ}\text{C}$  (Rahman et al., 2023), в Европе в зависимости от региона рост варьирует от 4 до 10% на  $^{\circ}\text{C}$  (Senatore et al., 2025; Berghald et al., 2025), а в Азии происходит увеличение интенсивности экстремальных осадков на 5-9% на  $^{\circ}\text{C}$  (Gummadi et al., 2025). Gan et al. (2025) показали, что за период с 1961 по 2022 гг. частота экстремальных осадков в большинстве регионов материкового Китая существенно увеличилась (до 56 раз), интенсивность событий возросла, особенно в Юго-Восточном Китае, а их длительность уменьшилась. Большую роль в формировании экстремальных осадков играют локальные особенности подстилающей поверхности. В урбанизированных районах интенсивность экстремальных осадков увеличивается сильнее, чем в окрестных сельских регионах, особенно на внутрисуточных временных масштабах (Huang et al., 2024).

### ***Наводнения***

Экстремальные осадки часто, хотя и не всегда, являются причиной наводнений. Возникновение наводнений является сложным многофакторным процессом. Кроме выпадения сильных осадков, причиной наводнений может быть изменение режима таяния снега, а также урбанизация, изменения землепользования и утрата биологических барьеров, которые ранее замедляли сток. Всё это повышает риск развития быстрых наводнений. В целом, в мире в последние годы наблюдается рост числа предупреждений об опасных паводках, особенно в США, где в 2025 к июлю Национальная метеослужба США (NWS) выпустила почти 4 000 предупреждений о внезапных паводках, что больше, чем в любой предыдущий год с середины 1980-х годов. Величина

ущерба, вызванного наводнениями, также существенно возросла. В Европе в 2024 году было зафиксировано самое большое число наводнений с 2013 года, при этом в 2020-2023 гг. средняя годовая стоимость ущерба, связанного с наводнениями, выросла, по данным European Environment Agency, более чем вдвое по сравнению с предыдущим десятилетием.

Так как причины возникновения наводнений имеют сильную пространственную неоднородность, то и изменения в частоте и интенсивности наводнений также сильно различаются для разных регионов. Для рек, расположенных в южной части Бразилии, ожидается увеличение масштабов наводнений, примерно, в пять раз. При этом в бассейнах Амазонки и Пантанала наводнениям будут происходить реже (Petry et al., 2025). В Европе за последние 70 лет отмечается увеличение площадей районов, подверженных наводнениям, особенно на низменных и равнинных территориях. Это происходит преимущественно за счёт рек, имеющих снеговой тип питания и находящихся в северной и центральной Европе (Fang et al., 2024). Для районов Южной Европы число наводнений, связанных с избыточным насыщением почвы, снижается, при этом число наводнений, связанных с выпадением экстремальных осадков, увеличивается, особенно в южной части Средиземноморского бассейна. Частота и интенсивность наводнений, связанных с таянием снега, уменьшаются в горных районах из-за уменьшения площадей, покрытых снегом (Tramblay et al., 2025). В Азии происходит увеличение числа и интенсивности мощных наводнений. Последние исследования показывают, что имеет место сезонная тенденция смещения пика наводнений с муссонного сезона (Hou et al., 2025). В работе Ding et al. (2024) было выявлен паттерн «жаркий восток – дождливый запад» (hot eastern – pluvial western), когда на востоке Азии усиливается экстремальная жара, а на западе – сильные наводнения. В работе Gudmundsson et al. (2026), по данным измерений, было показано, что в северных высоких широтах и некоторых районах Центральной Азии и в северной части Южной Америки речной сток значительно увеличился в период с 1971 по 2020 год. Значительное снижение речного стока наблюдается в Центральной Европе и Средиземноморье, центральной части Южной Америки, на Индийском субконтиненте, в Восточной Азии, южной и восточной Австралии и Новой Зеландии.

### *Засухи*

Увеличение частоты, длительности и интенсивности засух является одним из наиболее опасных последствий глобального потепления, которые мы наблюдаем уже сейчас, что отражено в большом количестве публикаций. Согласно последнему отчету OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (OECD, 2025), сейчас примерно 40% земной поверхности испытывают более частые и более интенсивные засухи по сравнению с прошлым. Недавняя работа, опубликованная в Science (Hoover, Smith, 2025), показывает, что площадь районов, подверженных многолетним засухам (длительностью в несколько лет), расширяется примерно на 50 000 км<sup>2</sup> в год за последние четыре десятилетия. К регионам, где усиление интенсивности засух наносит очень

---

серьезный ущерб, относятся Средиземноморье, Средний Восток, Южная Европа, Австралия, Западная и Северная Африка. В отчете OECD упоминается о все возрастающем числе так называемых “flash droughts”. Это засухи нового типа, которые развиваются очень быстро, вызывая существенный дефицит влаги в почве за очень короткий промежуток времени.

### *Тропические циклоны*

Частота появления и интенсивность тропических циклонов, а также их траектории определяются комбинацией различных факторов, таких как температура поверхности океана, влагосодержание атмосферы, вертикальный сдвиг ветра, термодинамическая устойчивость атмосферы, климатические осцилляции, такие как Эль-Ниньо-Ла-Нинья и Атлантическая Мультидекадная Осцилляция и др. С глобальным потеплением эти факторы изменяются, что приводит к изменениям в характеристиках тропических циклонов. Две главных характеристики тропических циклонов, активно обсуждаемых в научной литературе, – это частота их появления глобально и по бассейнам и их интенсивность. В целом количество тропических циклонов уменьшается, однако число наиболее опасных быстро развивающихся и интенсивных тропических циклонов увеличивается. В работе Li et al. (2024) показано, что за 1980-2021 годы наблюдается статистически значимый положительный тренд в количестве тропических штормов со скоростями ветра от 64 до 120 км/ч и интенсивных тайфунов со скоростями ветра выше 177 км/ч, что происходит в основном за счет увеличения их числа в Атлантическом бассейне. При этом число так называемых слабых тайфунов со скоростями от 120 до 177 км/ч уменьшается. Klotzbach et al. (2022), по данным наблюдений, обнаружили существенное уменьшение числа тропических циклонов и количества аккумулярованной ими энергии (Accumulated Cyclone Energy) за период с 1990 по 2021 годы, что обусловлено, главным образом, снижением циклонической активности в северной части Тихого океана. Недавняя работа Zhao et al., (2024) также показывает снижение частоты появления тропических циклонов за период с 1850 по 2014, по данным исторических симуляций 20 моделей СМIP6. Авторы объясняют это ослаблением вертикальных потоков в средней тропосфере над Тихим и Атлантическим океанами, связанным со смещением внутритропической зоны конвергенции из-за глобального потепления. Однако, число быстро развивающихся ураганов с тенденциями усиления скорости более 92 км/ч в день, а именно они приносят наибольшие разрушения, существенно увеличилось. Это было подтверждено в работе Manikanta et al. (2023) для тропических циклонов с тенденцией увеличения скорости более 55 км/ч в день, для которых частота их появления увеличилась более чем на 80% в 2000-2020 гг. по сравнению с 1981-2000 гг. С увеличением числа тропических циклонов, относящихся к категориям 3, 4 и 5 по шкале Саффира-Симпсона, увеличивается также интенсивность связанных с ними осадков, что приводит к увеличению угрозы наводнений, особенно в прибрежных районах (Emanuel, 2020).

### ***Изменение траекторий среднеширотных циклонов***

Среднеширотные циклоны, не являясь экстремальными событиями, обеспечивают перенос влаги, энергии и импульса и часто при совпадении определенных условий (Shahi et al., 2025), например, в взаимодействии с орографией, вызывают экстремальные осадки и сильные ветры. При глобальном потеплении меняются не только частота и интенсивность среднеширотных циклонов, но и их траектории. Изменение траекторий циклонов может существенно повлиять на районы выпадения осадков, в результате чего регионы в более высоких широтах, куда смещаются пути прохождения циклонов, могут стать подверженными выпадению более сильных осадков, тогда как прежние районы, где проходили траектории циклонов, могут начать испытывать дефицит осадков, приводящей к засухам. В работе Schemm et al. (2022) показано, что при «идеализированном» потеплении, то есть для модельных экспериментов с аквапланетой, происходит смещение траекторий наиболее глубоких циклонов, которые в основном ответственны за выпадение экстремальных осадков, в направлении полюсов. Эта тенденция наблюдается и при реальном потеплении как в Южном полушарии, так и в Северном полушарии и более четко выражена в северной части Тихого океана (Hsu et al., 2025; Chemke, Yuval, 2026). В работе Bender et al. (2012), основанной на анализе спутниковых данных, показано что происходит смещение к полюсам полос максимальной облачности, являющейся индикатором траектории циклонов. Для Северного полушария отмечается уменьшение частоты циклонов между 30°-60° с.ш. и увеличении севернее 60° с.ш., что интерпретируется как смещение траекторий циклонов. В целом существует очень ограниченное число работ, базирующихся на наблюдениях. Точную величину смещения траекторий оценить сложно из-за изменчивости положения траекторий и ограничений, связанных с данными, однако в работе Tamarin, Kaspi (2017) приводится примерная оценка в ~0.85°. Также наблюдается тенденция к существенному увеличению числа циклонов, связанных с экстремальными скоростями ветра (Fu et al., 2024). В работе (Binder, Wernli, 2024) показана также связь между положительными аномалиями в частоте циклонов и увеличением экстремально влажных и ветреных сезонов на большей части внетропических регионов.

### ***Анализ комплексных экстремальных событий***

Наиболее значимые ущербы могут быть обусловлены комплексными погодными и климатическими событиями, сводящимися к одновременному воздействию на социальные и экономические структуры сразу нескольких гидрометеорологических величин. При этом для отдельных входящих в комплексы величин отклонения от норм могут не обязательно соответствовать критериям опасных явлений, однако последствия от сочетаний таких отклонений от норм могут приводить к негативным последствиям вплоть до катастрофических.

Для учета взаимозависимости между отдельными гидрологическими и метеорологическими величинами необходим многомерный вероятностный

---

анализ их совместных распределений. Для такого анализа недостаточными являются оценки связи между величинами на основе корреляций Пирсона, предполагающих линейный характер связи. Восстановление многомерных функций распределений вероятностей нескольких метеовеличин представляется весьма сложной задачей, решение которой обычно ограничивается восстановлением параметров многомерных нормальных распределений или их смесей. Возможным методом, предоставляющим альтернативу, является метод копул. Копула – это функция, позволяющая перейти от одномерных распределений двух случайных величин к их совместному распределению. Копулы выгодны тем, что позволяют моделировать совместные распределения случайных переменных с большей гибкостью как с точки зрения маргинальных распределений, так и структуры зависимости.

Хорошее введение в проблему анализа совместных функций распределений нескольких взаимосвязанных случайных величин содержится в Рожков (2001). Вопросы использования аппарата копул для климатических исследований содержатся в статье Schölzel, Friederichs (2008). Среди русскоязычных публикаций следует отметить статью Болгова (2012), в которой обсуждаются методы построения двумерных законов распределения для широкого круга гидрологических задач, показаны эффекты, возникающие при использовании корреляций различного типа, и рекомендуются методы решения вероятностных задач в гидрологии, экологии.

Ранее нами отмечалась возможность использования аппарата копул для совместного вероятностного анализа и моделирования интенсивности-длительности-частоты волн жары (Mazdiyasi et al., 2019). Другим направлением использования аппарата копул в климатологии экстремальных событий является совместный вероятностный анализ наступления значительных аномалий двух и более величин. Так, в статье Cong, Brady (2022) для совместного анализа вероятностных распределений важнейших для агропроизводства климатических факторов – температуры и осадков – используются пять семейств моделей копул для моделирования взаимозависимости между осадками и температурой. Показано, что копула Стьюдента наиболее подходит для моделирования двумерного распределения осадков и температуры на основе критерия информации Акаике (AIC) и байесовского информационного критерия (BIC). В работе Tedesco et al. (2023) описывается методология моделирования совместных распределений низких температур и слабых ветров без каких-либо предположений об их маргинальных распределениях, для чего используются гауссовские копулы. Анализ проводится для отдельных месяцев годового цикла. Дополнительно при анализе учитываются фазы Североатлантического колебания. Полученные результаты находят практическое применение при планировании нагрузок на энергосистемы.

В работе Tavakol et al. (2020) подчеркивается, что комплексные экстремальные климатические явления оказывают непропорционально большее воздействие на экосистемы и человечество, чем простая сумма воздействий от их составляющих явлений. В силу этого сосредоточение внимания на одномерных статистиках для оценки вреда от комплексных экстремальных явлений обычно

оказывается недостаточным для донесения реального риска. В данном исследовании был проанализирован случай одновременного возникновения жарких, сухих и ветреных явлений (HDWs: Hot, Dry, and Windy events) – в центральной части Соединенных Штатов за период 1949-2018 годов. Использование копулы для изучения одновременного возникновения нескольких экстремальных явлений позволило выявить больший риск возникновения HDW по сравнению с традиционным эмпирическим анализом, когда рассматриваются независимо маргинальные распределения возникновения явлений. Результаты, изложенные в статье, свидетельствуют об увеличении риска возникновения одновременного явления HDW, несмотря на историческое снижение скорости ветра на большей части анализируемых регионов.

### **Часть 3. Изменения экстремальных событий в России**

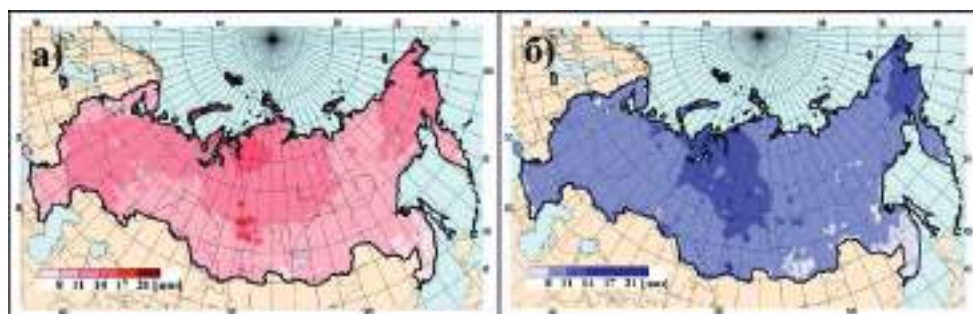
Для территории России результаты исследования индексов экстремальности климата приводились в ряде публикаций. Так, в Коршунова и др., (2018) в качестве индексов климатических экстремумов используется число дней за сезон, когда метеорологический параметр выше или ниже некоторого предельного значения. Значение метеорологической величины, соответствующее границе 95%-ного или 5%-ного интервала ранжированного ряда (т.е. эмпирически оцениваемого квантиля), рассматривалось как предельное. Подсчитывалось количество дней за сезон каждого года, когда величина метеорологического элемента выходила за предельное значение. По рядам полученных величин для минимальной и максимальной суточной температуры и суточным суммам осадков на каждой станции рассчитывались коэффициенты линейного тренда. Анализ проводился по данным в точках станций и по рядам средних для 18 квазиоднородных климатических регионов, выбранным на основании классификации Алисова.

В работе Коршуновой и Давлетшина (2021) для территории Российской Федерации исследовалась динамика характеристик экстремальности климата. Расчеты проводились с использованием массива данных о температуре и осадках по 488 станциям за периоды от начала наблюдений на станциях до 2020 г включительно. Рассматривались следующие индексы: HWDD – продолжительность волн жары. Рассчитывается как максимальное количество последовательных дней за год (не менее 5 дней) с суточным максимумом, превышающим норму более чем на 5°C. В качестве нормы использовалась средняя за период 1961-1990 гг. максимальная температура соответствующего дня. CWDD – продолжительность волн холода. Рассчитывается как максимальное количество последовательных дней за год (не менее 5 дней) с суточным минимумом, ниже нормы более чем на 5°C. В качестве нормы использовалась средняя за период 1961-1990 гг. минимальная температура соответствующего дня. T90 – индекс теплых ночей представляет собой число дней за год с суточным минимумом температуры выше 90 перцентиля, выраженное в процентах от общего числа дней. Tn10 – индекс холодных ночей представляет собой число дней за год с суточным

---

минимумом температуры ниже 10 перцентиля, выраженное в процентах от общего числа дней. CDD – максимальное за год число последовательных «сухих» периодов (с осадками не более 1 мм). R95 – доля интенсивных осадков. Рассчитывается как процентное отношение интенсивных осадков к годовой сумме. Под интенсивными осадками понимались осадки, суточная сумма которых превышала 95 перцентиль за период 1961-1990 гг. R10 – число дней с интенсивными осадками. Для умеренных широт осадки более 10 мм можно считать интенсивными.

Авторами работы (Коршунова, Давлетшин, (2021)) показано, что на большей части страны в последние годы возрастает экстремальность климата, что выражается в увеличении индексов продолжительности как волн жары; так и волн холода, а значит в их более частой смене (рис. 9). Это обусловлено влиянием многих факторов, в числе которых циркуляционные, мезо- и микроклиматические особенности районов. Влияние волн жары на уровень смертности в городах РФ, расположенных в разных климатических зонах, обсуждалось в статьях Ревич (2017) и в Revich, Shaposhnikov (2017). Ими было показано, что волны жары существенно увеличивают уровень смертности, превышающий смертность от волн холода.



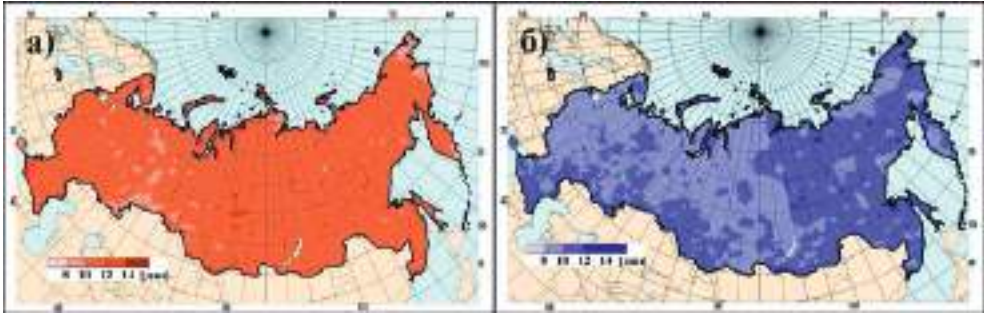
**Рисунок 9.** Средние многолетние значения индексов продолжительности волн жары (а) и волн холода (б)

*Источник: Коршунова, Давлетшин, 2021*

**Figure 9.** Long-term average values of heat wave duration indices (a) and cold wave duration indices (b)

*Source: Korshunova, Davletshin, 2021*

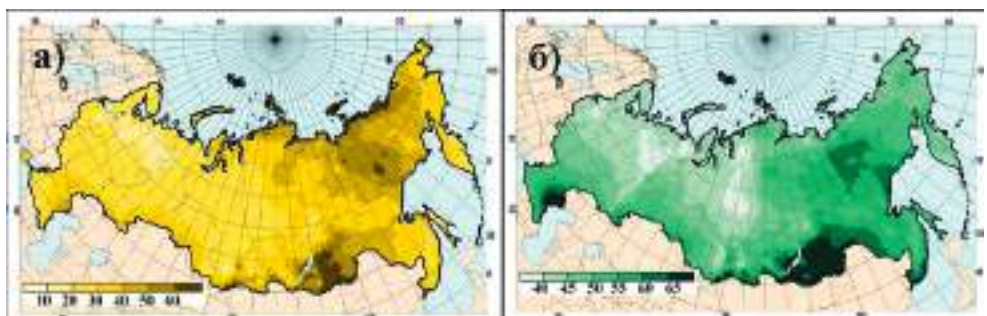
Среднее значение индекса теплых ночей слабо меняется и на большей части страны составляет 10-11% (рис. 10а). Максимальные значения 12-13% территориально совпадают с очагом максимальных значений индекса HWDD. Минимальные значения 8-9% отмечены на Южном Урале, в северо-восточных районах ЕТР, а также на тихоокеанском побережье Чукотки и Камчатки. Значительно больше изменяется по территории индекс холодных ночей (рис. 10б), поскольку на режим минимальной температуры воздуха в большей степени, чем на режим максимальной температуры, влияют особенности рельефа. Это определяет такой «пятнистый» характер пространственного распределения.



**Рисунок 10.** Средние многолетние значения индексов тёплых (а) и холодных ночей (б)  
*Источник: Коришунова, Давлетишин, 2021*

**Figure 10.** Long-term average values of warm night indices (a) and cold night indices (b)  
*Source: Korshunova, Davletshin, 2021*

Анализ изменения индексов экстремальности влажностного режима показал, что в северо-западных областях Европейской территории России увеличение числа дней с интенсивными осадками не приводит к увеличению их доли в годовой сумме осадков, а продолжительность «сухих» периодов уменьшается из-за увеличения числа дней с малоинтенсивными осадками (рис. 11). На юге европейской территории России выявленная тенденция увеличения «сухих» периодов обусловлена уменьшением интенсивных осадков. В пространственном распределении индекса «сухих» периодов выделяются два обширных очага максимальных значений в Республике Саха-Якутия, включая арктические острова, и в Забайкалье (рис. 11а), которые обусловлены, большей частью, продолжительными периодами без осадков в зимний период, когда эти районы находятся в зоне влияния Сибирского антициклона. В отдельные годы продолжительность «сухих» периодов в этих районах может превышать 100-130 дней. Однако в летнее время в этих же районах, а также на северном побережье Охотского моря, в бассейне Ангары и в Приморье увеличивается число дней с экстремальными осадками, что приводит к увеличению доли интенсивных осадков в годовой сумме и к формированию очагов максимальных значений индекса R95 (рис. 11б).



**Рисунок 11.** Средние многолетние значения индекса «сухих» периодов (а);  
средние многолетние значения индекса «интенсивных осадков» (б)  
*Источник: Коришунова, Давлетишин, 2021*

**Figure 11.** Long-term average values of the “dry” period index (a) and the “heavy precipitation” index (b)  
*Source: Korshunova, Davletshin, 2021*

В ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» с помощью метода квантильной регрессии проводится исследование детальной структуры климатических трендов как для температуры в свободной атмосфере по радиозондовым данным, так и для приземной температуры. Так, в работе Стерин, Лавров (2022) исследование климатических трендов приземной температуры проводится на данных более чем 1400 метеорологических станций на территории России. Для пространственного обобщения полученных квантильных оценок трендов была выполнена кластеризация в многомерном пространстве характеристик квантильных трендов приземной температуры. При формировании многомерного пространства учитывались сезонные характеристики процесс-диаграмм трендов аномалий для трех характеристик суточной температуры: минимальной, максимальной и средней суточной температур. В результате кластеризации было показано, что, несмотря на отсутствие среди переменных многомерного пространства характеристик географического положения пунктов наблюдений, полученные кластеры не только располагаются географически компактно, но и в основном соответствуют известным подходам к выделению на территории России квази-однородных климатических регионов. В качестве следующего шага анализа климатических трендов методом квантильной регрессии представляются целесообразными вычисление значений трендов с формированием многомерного пространства по характеристикам как температуры, так и осадков, и кластеризация станций по характеристикам квантильных трендов обеих этих метеовеличин. В работе Лаврова, Стерина (2024) была проведена кластеризация рассчитанных климатических трендов и проанализированы пространственные особенности полученных кластеров метеорологических станций и их соответствие квазиоднородным климатическим регионам, используемым для обобщающих оценок состояния климата в «Докладах об особенностях климата на территории РФ», ежегодно выпускаемых Росгидрометом. Выделены 15 кластеров метеорологических станций на территории РФ (рис. 12), таких, что входящие в кластеры станции демонстрируют схожие особенности («паттерны») трендов максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков. При этом в процессе кластеризации величины, определяющие географическое положение метеостанций, не участвовали.

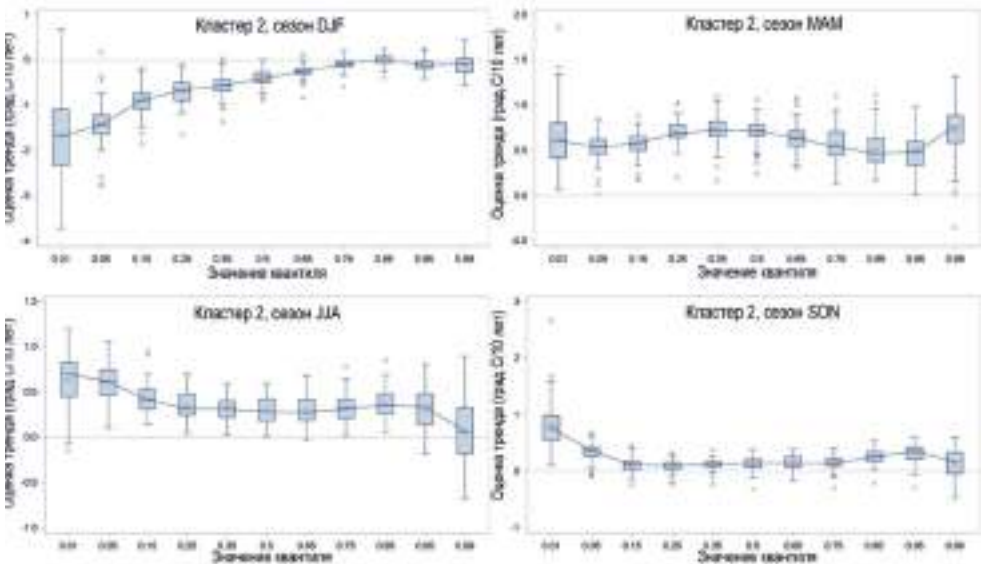
На рис. 13 представлен пример обобщения в виде «ящиков с усами» процесс-диаграмм квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков. Первый ряд – обобщения в виде «ящиков с усами» процесс-диаграмм квантильных трендов аномалий температуры для зимнего (левый столбец) и весеннего (правый столбец) сезонов, второй ряд – для летнего (левый столбец) и осеннего (правый столбец) сезонов. Третий и четвертый ряды – аналогичная первому и второму рядам, но для квантильных трендов суточных сумм осадков. Пример на рис. 13 представлен для станций кластера 2, выделенного на рис. 12 (Кемеровская область, восток Новосибирской области и Алтайского края, юго-восток Томской области и юг Красноярского края). Источник (Лавров, Стерин, 2024)

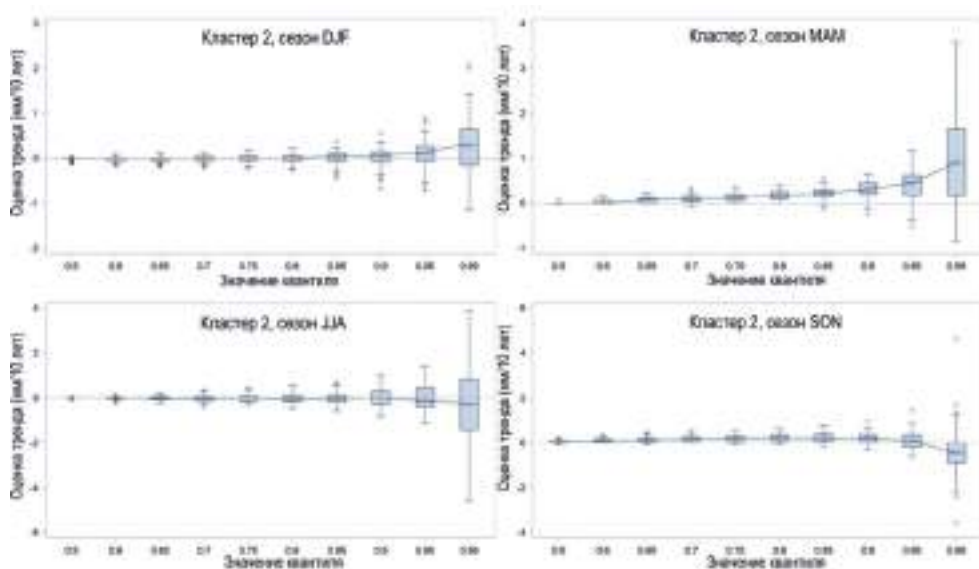


**Рисунок 12.** Пятнадцать кластеров метеорологических станций территории РФ, объединенных сходством проявления квантильных трендов максимальной суточной температуры и суммы осадков

*Нумерация кластеров носит условный характер. Источник: Лавров, Стерин, 2024*

**Figure 12.** Fifteen clusters of meteorological stations across the Russian Federation, grouped according to the similarity of quantile trends in daily maximum temperature and total precipitation  
*Cluster numbering is arbitrary. Source: Lavrov, Sterin, 2024*





**Рисунок 13.** Паттерны проявления квантильных трендов для аномалий максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков по метеорологическим станциям, отнесенным к различным кластерам

*По горизонтальной оси – значения квантилей от 0.05 до 0.95,  
по вертикальной оси – значения квантильных трендов аномалий  
(детальное пояснение см. в тексте)*

**Figure 13.** Patterns of quantile trends for anomalies in daily maximum temperature and daily precipitation totals at meteorological stations assigned to different clusters

*The horizontal axis shows quantile values from 0.05 to 0.95 and the vertical axis shows the corresponding quantile trend values of the anomalies  
(detailed explanation see in the text)*

С использованием метода квантильной регрессии могут быть решены практически важные задачи учета долгопериодных изменений климата при уточнении климатических индексов, в том числе при уточнении индексов экстремальности климата.

Наводнения на территории России обусловлены несколькими основными факторами: весенним снеготаянием, ледяными заторами, а также сильными осадками, в основном в летний период и иногда – ветровыми нагонами (Frolova et al., 2017). В сибирских и дальневосточных бассейнах наблюдается увеличение числа экстремальных гидрологических событий, обусловленное быстрым снеготаянием и ливневыми дождями. Интенсивность паводковых волн за последние 110 лет усилилась, особенно на европейской территории России (Frolova et al., 2017). Также рост температуры вызывает перераспределение роли факторов, влияющих на возникновение паводков. Так, существенное потепление (примерно на 1.8°C) на Восточно-Европейской равнине с 1991 по 2020 гг. характеризовались значительным увеличением числа оттепелей, повторяемость которых возросла в 2.6 раза, что существенно повлияло на формирование стока Дона, наибольшее увеличение которого (на 55.7%)

наблюдалось в январе. При этом роль оттепелей в формировании зимнего стока существенно возросла, а влияние суммарных осадков снизилось (Черенкова и др., 2024).

#### **Часть 4. Экстремальные погодно-климатические явления в будущем климате**

Ожидается, что изменение интенсивности и частоты возникновения экстремальных погодно-климатических аномалий в будущем климате до конца XXI века будет связано с развитием глобального потепления. Современные климатические модели показывают относительно неплохое воспроизведение статистики экстремальных погодно-климатических явлений, связанных с экстремальностью температуры и экстремальностью осадков, для современного климата (Kim et al., 2020). Там показано, что ансамбль климатических моделей CMIP6 неплохо воспроизводит наблюдаемые величины большинства рассмотренных индексов экстремальности, принятых ETCCDI. Заметный прогресс в воспроизведении этих индексов экстремальности в климатическом моделировании происходит и в нашей стране (Володин, Тарасевич, 2018). Вместе с тем, экстремальные события, связанные с порывами сильного ветра, соответствуют наблюдениям гораздо хуже как в региональных, так и в глобальных моделях климата (Кислов и др., 2018; Platonov et al., 2020). Приведем некоторые оценки ожидаемых изменений развития экстремальных явлений согласно данным климатических моделей.

В (Seneviratne et al., 2021) показано, что удобно рассматривать статистику экстремальных событий не для выбранного сценария и выбранного временного интервала лет, а для определенных уровней глобального потепления, например, в 1.5, 2, 3, 4 градуса. Именно этого подхода мы и будем в основном придерживаться в этом разделе. Там утверждается также, что с очень высокой степенью вероятности экстремально высокие температуры при любом рассматриваемом уровне глобального потепления будут выше, чем для современного климата. Следует ожидать также и повышения экстремально низких температур. На территории России практически везде повышение экстремально низких температур, например, минимальной за год температуры  $T_{Np}$ , будет согласно климатическим моделям происходить заметно быстрее, чем повышение экстремально высоких температур, например, максимальной за год температуры  $T_{Xx}$ , при любых уровнях глобального потепления. Повышение  $T_{Xx}$  на территории России может примерно в 2 раза превышать, а повышение  $T_{Np}$  – в 3-4 раза превышать повышение глобальной температуры. Если использовать определение волн тепла из статистики современного климата, то продолжительность, интенсивность и площадь волн тепла при любых сценариях глобального потепления будет намного больше современных значений. На территории России повышение  $T_{Np}$  следует ожидать с несколько большей скоростью, чем повышение средней за зиму температуры. Повышение  $T_{Xx}$  на территории России следует ожидать примерно с такой же скоростью, как и повышение температуры средней за июнь-август. Более быстрый

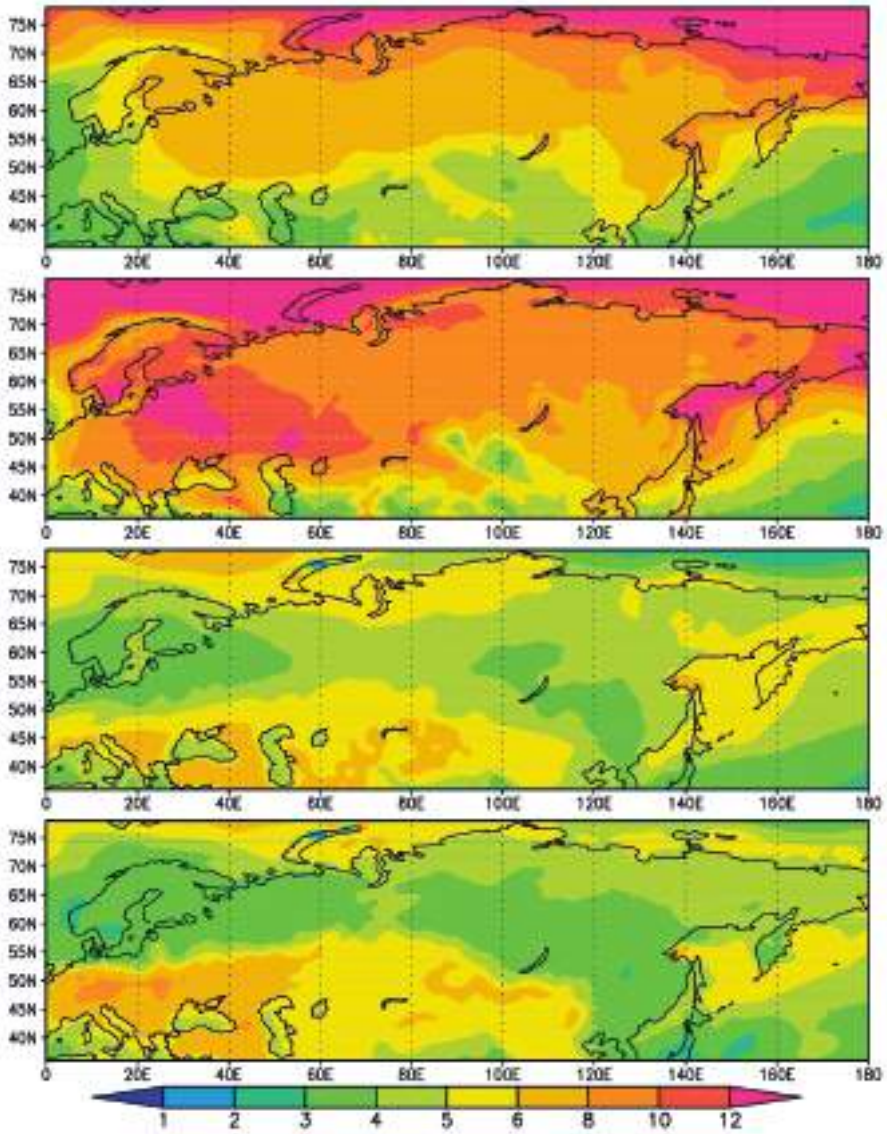
---

рост экстремально высоких температур по сравнению со средней температурой лета возможен вследствие взаимодействия аномалий температуры с аномалиями влажности почвы (Volodin, Yurova, 2013). Там, где в условиях современного климата почва летом практически всегда содержит количество влаги, достаточное для существенного испарения, а при развитии потепления иногда возможно высыхание почвы, препятствующее испарению, можно ожидать более быстрого роста экстремально высоких летних температур по сравнению с ростом средних температур летом.

Для примера на рис. 14 приведено изменение средней за зиму (декабрь-февраль) и средней за лето (июнь-август) температуры в Северной Евразии, а также T<sub>Nn</sub> и T<sub>Xx</sub> в 2081-2100 гг., по сравнению с 2001-2020 гг., по данным модели климата INM-CM6M (Gritsun et al., 2024). Для будущего использовался сценарий SSP3-7.0, и изменение глобально осредненной приземной температуры за рассматриваемый промежуток времени составляет около 3.5 градусов. На территории России изменение T<sub>Nn</sub> практически везде больше, чем изменение средней за зиму температуры. Изменение почти везде меньше, чем изменение средней за лето температуры за исключением Южной и Центральной Европы и юга России, где повышение T<sub>Xx</sub> может превышать повышение средней за лето температуры на 2-3 градуса. В этих местах летом можно ожидать также увеличения среднеквадратичного отклонения (СКО) температуры, а также увеличение асимметрии функции распределения (Volodin, Yurova, 2013). В целом же на территории России согласно данным климатических моделей почти везде при развитии глобального потепления можно ожидать уменьшения СКО температуры как в зимние, так и в летние месяцы. Основной причиной этого является уменьшение разницы температур между тропиками и высокими широтами. Уменьшение СКО приземной температуры на большей части территории России в исторический период подтверждается и данными станционных наблюдений (Бабина, Семенов, 2022).

Рассмотрим изменение экстремальных погодно-климатических событий, связанных с увлажнением. Согласно (Li et al., 2020; Seneviratne et al., 2021) при развитии потепления почти везде на суше следует ожидать увеличения интенсивности экстремальных осадков. Интенсивность наиболее сильных осадков, например, максимальных за год суточных сумм осадков R<sub>x1day</sub> растет примерно со скоростью 7% на 1 градус потепления, что хорошо соответствует росту насыщенной влажности с ростом температуры. Интенсивность максимальной за год 5-дневной суммы осадков R<sub>x5day</sub>, а также интенсивность более редких экстремальных осадков растет примерно с такой же скоростью. Исключения составляют некоторые районы, например, юг Европы летом, включая и юг Европейской территории России (ЕТР). Интенсивность умеренно-экстремальных осадков растет, как правило, слабее и может более существенно зависеть от географического места и сценария потепления (Lin et al., 2016). Частота возникновения экстремальных осадков заданной интенсивности растет, как правило, сильнее чем линейно с ростом потепления (Kharin et al., 2018). Например, частота возникновения осадков,

наблюдающихся раз в 10 лет, может увеличиться в 2-3 раза при глобальном потеплении на 4 градуса (Li et al., 2020).



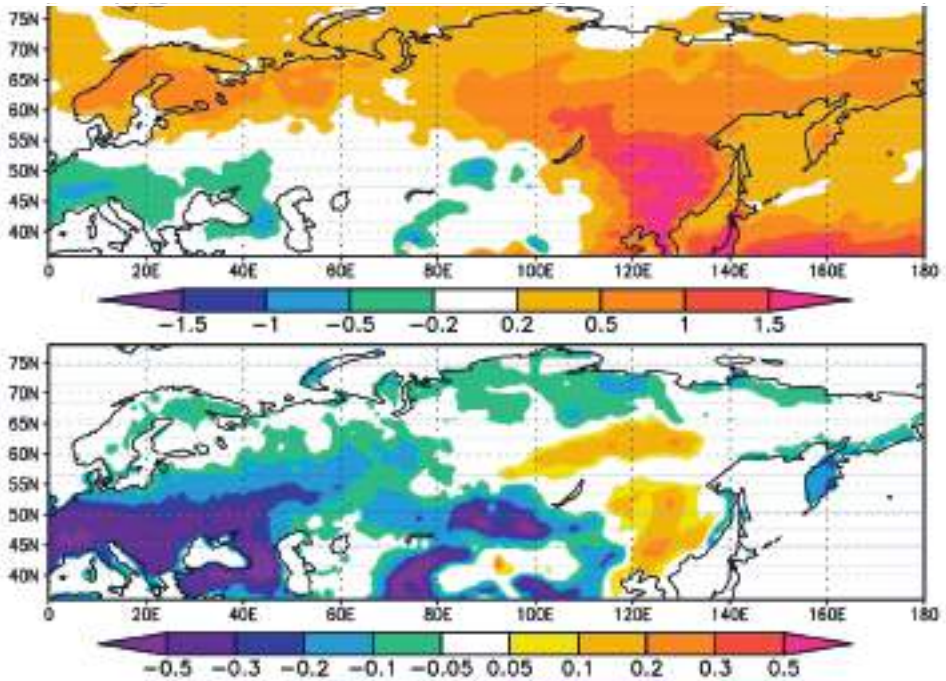
**Рисунок 14.** Сверху вниз: Изменение средней температуры зимой, TNn; температуры летом, TXx (K) в 2081-2100 гг. при сценарии SSP3-7.0, по сравнению с 2001-2020 гг. в Северной Евразии, по данным модели INM-CM6M

**Figure 14.** From top to bottom: change in mean winter temperature, TNn; summer temperature, TXx (K) for 2081-2100 under the SSP3-7.0 scenario compared to 2001-2020 in Northern Eurasia, according to the INM-CM6M model

Статистика экстремальных засух существенно зависит от того, какой критерий наступления таких событий используется. Одним из критериев может быть дефицит осадков или продолжительность периода без существенных осадков (CDD). Согласно этому критерию, увеличение засушливости при

развитии потепления с большой вероятностью следует ожидать, в частности, в окрестностях Средиземного моря и на юге Европы (Seneviratne et al., 2021), в Центральной Европе тоже есть вероятность увеличения засушливости, но там результаты глобальных и региональных моделей менее согласованы. Но можно в качестве критерия засухи использовать значение влажности почвы. При потеплении увеличивается испарение с почвы, и это приводит к тому, что почва может становится более сухой даже там, где уменьшения количества осадков не происходит (Dai et al., 2018). Реакция физиологии растений на рост температуры и увеличение концентрации  $\text{CO}_2$ , в частности, увеличение устьичного сопротивления, лишь частично компенсирует увеличение испарения. Поэтому летом на Европейской части России и в Западной Сибири южнее примерно 60 градуса широты можно ожидать уменьшения влажности почвы и более частых и продолжительных почвенных засух, даже там, где уменьшения средних за лето осадков не ожидается. В среднем ожидается, что на территории суши почвенные засухи, происходящие в 1850-1899 гг. раз в 10 лет, будут происходить в 2 раза чаще при глобальном потеплении на 1.5 градуса и в 4 раза чаще при глобальном потеплении на 4 градуса (Seneviratne et al., 2021). Этот вывод согласуется и с результатами обработки более ранних данных климатических моделей (Кислов и др., 2008). Там, по данным климатических моделей СМIP3, вычислялись индекс засушливости Педя и гидротермический коэффициент Селянинова для современного и будущего климата, и было показано, что при развитии глобального потепления в XXI веке на Европейской части России южнее 58 градуса летом ожидаются более засушливые условия, а севернее можно ожидать уменьшения вероятности возникновения как очень сухих, так и очень влажных условий. Для примера приведем изменение осадков летом в 2081-2100 гг. при сценарии SSP3-7.0, по сравнению с 2001-2020 гг. в Северной Евразии, по данным модели INM-CM6M (рис. 15). В Европе и Западной Сибири севернее примерно 55 градуса с.ш. ожидается увеличение количества осадков, а южнее – уменьшение. В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке ожидается увеличение осадков. Тем не менее, уменьшение влагосодержания почвы ожидается практически везде в Европе и Западной Сибири, а также на севере Восточной Сибири, то есть даже там, где ожидается увеличение осадков.

Тропические ураганы являются одним из наиболее значимых экстремальных погодно-климатических явлений. Анализ данных региональных и глобальных климатических моделей, разрешающих масштаб тропических ураганов (Knutson et al., 2020), показывает, что при развитии глобального потепления можно ожидать уменьшения общего количества тропических ураганов. Однако, возрастет доля сильных тропических ураганов 4-5 категории и интенсивность самых сильных ураганов, измеряемая как максимальная скорость приземного ветра, или минимальное давление на уровне моря, увеличится.



**Рисунок 15.** Изменение осадков, мм/сут (вверху) и влажности почвы в верхнем 10-сантиметровом слое, см (внизу) в 2081-2100 гг., по сравнению с 2001-2020 гг. летом, по данным модели INM-CM6M

**Figure 15.** Changes in precipitation (mm/day, top) and soil moisture in the upper 10-cm layer (cm, bottom) for 2081-2100 compared to 2001-2020 during summer, according to the INM-CM6M model

Исследование изменений вероятности возникновения конвективных явлений в будущем климате, как правило, проводились для ограниченных регионов, поэтому могут быть неприменимы к другим регионам. Тем не менее, согласно (Rasmussen et al., 2020), с некоторой вероятностью можно ожидать уменьшения повторяемости слабых и средних конвективных событий и увеличение повторяемости сильных конвективных событий.

При развитии глобального потепления можно ожидать сдвиг на север траекторий циклонов умеренных широт (Zarra et al., 2013) и связанных с этим экстремальных осадков и ветров. Вместе с тем, общее число циклонов и экстремальных циклонов изменится незначительно или немного уменьшится.

В будущем более теплом климате можно ожидать уменьшения средней скорости ветра в тропиках и умеренных широтах и увеличение средней скорости ветра к северу от 70 градуса с.ш. (Seneviratne et al., 2021). Тем не менее, можно ожидать увеличения скорости самых экстремальных ветров, связанных с тропическими циклонами или интенсивными конвективными системами. Последний вывод сделан на основе данных климатических моделей, пространственное разрешение которых составляет порядка 10-20 км и которые могут воспроизводить современную наблюдаемую статистику тропических ураганов и штормов.

Многие экстремальные погодно-климатические события в умеренных широтах, в том числе на территории России, обусловлены возникновением блокингов. С ними могут быть связана устойчивая аномально холодная погода зимой, продолжительные периоды жаркой и сухой погоды летом. Выше и ниже по потоку от блокирующих антициклонов могут возникать условия, способствующие избыточному увлажнению, в том числе экстремально интенсивным осадкам, наводнениям. Поэтому интересно знать, что станет с интенсивностью и продолжительностью блокингов при развитии глобального потепления. В частности, в (Lohmann et al., 2024) показано, что модели CMIP6 показывают в целом при развитии глобального потепления в XXI веке уменьшение частоты возникновения блокингов почти везде в умеренных широтах Северного полушария как зимой, так и летом, но это уменьшение является небольшим.

### **Часть 5. Глобальное потепление как основной фактор изменений частоты и интенсивности экстремальных событий**

Вопрос о механизмах увеличения интенсивности и повторяемости экстремальных событий при глобальном потеплении очень важен. В первую очередь, потепление усиливает общую энергию климатической системы. Наблюдающийся в последние десятилетия положительный радиационный дисбаланс в  $\sim 1 \text{ В/м}^2$  приводит к накоплению избыточного тепла в климатической системе. Примерно 91% его аккумулируется в океане как в одном из наиболее теплоемких компонентов климатической системы, 5% в суше, 3% в ледниках и всего 1% в атмосфере. Таким образом, именно аккумуляция дополнительной энергии в океане приводит к интенсификации процессов обмена теплом, массой и импульсом между океаном и атмосферой (Yu, 2019). Этот процесс имеет два последствия, важных для возникновения экстремальных событий. Во-первых, усиливается испарение с поверхности океана и в атмосфере аккумулируется большее количество водяного пара, потенциально доступного для образования осадков, что еще не обеспечивает увеличения количества осадков в конкретном месте. Согласно уравнению Клаузиуса-Клапейрона, при потеплении воздуха на  $1^\circ\text{C}$  его способность удерживать водяной пар увеличивается примерно на 7%. Во-вторых, происходят изменения в атмосферной циркуляции и циркуляционных режимах. В работе Kjellsson (2015) показано, что с каждым градусом глобального потепления атмосферная циркуляция ослабевает примерно на 5%. Это связано с уменьшением транспортировки массы атмосферы, особенно в экваториальных и тропических широтах. В то же время наблюдается расширение циркуляции в термодинамических координатах, что связано с увеличением сухой статической энергии и скрытой теплоты в тропосфере. Это приводит к увеличению меридионального переноса тепла при одновременном уменьшении меридионального переноса массы. Эти процессы, а также более сильный прогрев Арктики по сравнению с тропическими широтами приводит к ослаблению температурного градиента полюсами и экватором. В результате этого происходит замедление струйного

течения и усиление блокирующих циркуляционных систем (блокингов), что приводит к более частому возникновению волн жары и экстремальной погоды (Sukhanovskii et al., 2024; Bacer et al., 2022; Luo et al., 2018). Идея климатического прогнозирования экстремумов регионального климатического режима с точки зрения прогноза их статистического поведения была сформулирована в Myslenkov et al. (2018). Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в понимании механизмов влияния глобального потепления на увеличение частоты и интенсивности экстремальных событий в основном благодаря высококоразрешающему климатическому моделированию, остается много неясных вопросов, связанных, в первую очередь, с региональными особенностями проявления экстремальных климатических событий.

### ***Современные методы анализа вклада антропогенного фактора***

Для того чтобы оценить, насколько антропогенный фактор повлиял на возникновение конкретного экстремального события и насколько подвержены разным видам экстремальных событий различные регионы используются так называемые атрибутивные исследования. Для этого применяются разные подходы, базирующиеся в основном на анализе результатов климатических моделей. Среди методов, используемых в этих исследованиях, можно выделить так называемый «прямой метод», когда проводится сравнение вероятности или интенсивности данного экстремума в «реальном климате» (с антропогенным влиянием) и в «контрфактическом» климате без антропогенного влияния, в результате чего получают *отношение рисков* (risk ratio, RR) или *долю атрибуруемого риска* (fraction of attributable risk, FAR) (Lewis et al., 2019). Также используется «storyline»-подход, когда анализируется конкретный сценарий (например, фиксированная циркуляционная аномалия) и оценивается, насколько изменение термодинамики (например, повышение базовой температуры) усилило данное событие (Terraу, 2021). Также широко используется метод циркуляционных аналогов (flow-analogue attribution) (Noyelle et al., 2025), позволяющий выделить события со схожей динамикой синоптического процесса и оценить вероятность возникновения данного события в условиях наблюдающегося потепления. В качестве примеров таких исследований можно привести анализ волны жары в Сибири в 2020, когда температура в Верхоянске в июне 2020 года достигла 38° (Ciavarella et al., 2021). В этой работе анализировались средние температуры с января по июнь в северной части Сибири и максимальные суточные температуры в районе города Верхоянска. Было получено, что антропогенное изменение климата существенно увеличило (как минимум в 600 раз) вероятность возникновения и интенсивность наблюдавшейся волны жары в этом регионе, и без антропогенного фактора такое событие было бы маловероятным в 2020 году.

### **Заключение**

Имеющиеся результаты обработки и анализа наблюдений за окружающей природной средой убедительно демонстрируют связь роста частоты и

---

интенсивности экстремальных климатических событий с возрастанием темпов глобального потепления в XXI веке. В пользу этого утверждения относительно динамики таких экстремальных событий, в том числе и в предстоящие десятилетия, убедительно свидетельствуют многочисленные результаты, предоставляемые физико-динамическими моделями климата.

Обоснованность представлений о процессах различных пространственных и временных масштабов в климатической системе определяется целым рядом факторов, среди которых развитие наблюдательных систем и качество наблюдений за климатом, развитие методов эмпирического анализа климатических процессов, уровень развития вычислительных систем и технологий и множество других факторов. Учет этих факторов в определении приоритетов климатической политики чрезвычайно важен для России, где значительно выражено многообразие климатических условий, где темпы потепления, особенно в северных регионах, превышают темпы глобального потепления и значительная часть территории относится к зоне многолетней мерзлоты.

Есть основания полагать, что Седьмой оценочный доклад МГЭИК, подготовка которого ведется в период написания данной обзорной статьи, представит еще более убедительные, уточненные и детализированные оценки связи между ростом частоты экстремальных событий и темпами возрастания глобальной температуры.

### Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность чл.-корр. РАН профессору С.М. Семенову за инициативу по подготовке настоящей статьи и постоянное внимание к ходу ее написания и коллегам, материалы публикаций которых использованы в данной обзорной работе, в том числе: Е.М. Акентьевой (ФГБУ «ГГО им А.И. Воейкова»), Н.Н. Коршуновой, А.С. Лаврову, Н.В. Швець, С.Г. Давлетшину (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»).

*В работе использованы материалы и результаты проекта 3.2 Плана НИТР Росгидромета. ОГЗ получала поддержку проекта 075-15-2025-203 «Приоритет-2030», ЕМВ поддержан Московским центром фундаментальной и прикладной математики в ИВМ РАН (Соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2025-347).*

### Список литературы

Бабина, Е., Семенов, В. (2022) Изменения интенсивности колебаний суточной температуры воздуха в диапазонах внутримесячной изменчивости на территории России в 1970-2018 гг., *Известия РАН. География*, т. 86, № 4, с. 528-546.

Болгов, М.В. (2012) Современное состояние теории корреляции для гидрологических расчетов и стохастического моделирования, *Водное хозяйство России*, № 4, с. 7-20.

ВМО-№ 1157 (2015) *Семнадцатый Всемирный метеорологический конгресс: Сокращенный окончательный отчет с резолюциями*, Женева.

ВМО-№ 1203 (2017) *Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм*, ВМО-№ 1203, 21 с.

Володин, Е., Тарасевич, М. (2018) Воспроизведение индексов погодно-климатической экстремальности климатической моделью ИВМ РАН, *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 68-76.

Кислов, А.В., Евстигнеев, В.М., Малхазова, С.М., Суркова, Г.В., Торопов, П.А., Чернышев, А.В., Чумаченко, А.Н. (2008) *Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века*, М., Макс-Пресс, 290 с.

Кислов, А.В., Ривин, Г.С., Платонов, В.С., Варенцов, М.И., Розинкина, И.А., Никитин, М.А., Чумаков, М.М. (2018) Мезомасштабное моделирование экстремальных ветров над Охотским морем и островом Сахалин, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 54, № 4, с. 381-385.

Кислов, А.В., Антипина, У.И., Корнева, Н.А. (2021) *Экстремальные осадки Европейского сектора Арктики в летний период: статистика и синоптические модели*, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 20-34.

Коршунова, Н.Н., Булыгина, О.Н., Разуваев, В.Н., Давлетшин, С.Г. (2018) Оценки экстремальности температурного режима и режима осадков для территории РФ и ее регионов, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 183, с. 20-30.

Коршунова, Н.Н., Давлетшин, С.Г. (2021) Изменение индексов экстремальности на территории России, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 189, с. 116-127.

Коршунова, Н.Н., Швець, Н.В. (2023) Региональные особенности изменения норм основных климатических параметров на территории России, *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, вып. 387, с. 131-147.

Круглова, Е.Н., Куликова, И.А., Тищенко, В.А., Хан, В.М. (2019) Прогнозирование волн тепла на внутрисезонных масштабах времени, *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, вып. 371, с. 95-108.

Лавров, А.С., Стерин, А.М. (2024) Детализация климатических трендов температуры и осадков на территории РФ с использованием квантильной регрессии и кластеризации, *Фундаментальная прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 219-243, doi:10.21513/0207-2564-2024-2-219-243.

МГЭИК (2012) *Резюме для политиков Специального доклада по управлению рисками экстремальных явлений и бедствий для содействия адаптации к изменению климата*, К.Б. Филд, В. Баррос, Т.Ф. Стокер, Д. Цинь, Д. Дж. Доккен, К.Л. Эби, М.Д. Мастрандреа, К.Дж. Мэч, Дж-К. Платтнер, С.К. Аллен, М. Тигнор, П. Миджлей (ред.), Специальный доклад Рабочих I и II Межправительственной группы экспертов по изменению климата, Кэмбридж Юниверсити Пресс, Кэмбридж, СК и Нью-Йорк, шт. Нью-Йорк, США, 19 с.

---

Ревич, Б.А. (2017) Волны жары в мегаполисах и пороги их воздействия на смертность населения, *Гигиена и санитария*, т. 96(11), с. 1073-1078, doi: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11-1073-1078>.

Рожков, В.А. (2001) *Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами*, кн. 1, Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 340 с.

Росгидромет (2020) *Климат России. Особенности экстремальных погодных явлений*, URL: <https://meteoinfo.ru>.

*Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами* (2008) Под ред. д-ра геогр. наук, профессора Н.В. Кобышевой, СПб., 336 с.

Стерин, А.М., Тимофеев, А.А. (2016) Об оценке трендов приземной температуры воздуха для территории России методом квантильной регрессии, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 17-30.

Стерин, А.М., Лавров, А.С. (2022) Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 92-111.

Талёб, Н.Н. (2023) *Статистические последствия жирных хвостов*, М., КоЛибри, 480 с.

Черенкова, Е.А., Георгиади, А.Г., Золотокрылин, А.Н., Кашутина Е.А. (2024) Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата на Восточно-Европейской равнине и их влияние на речной сток (на примере Дона), *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, т. 88, № 3, с. 349-364, doi:10.31857/S2587556624030075.

Abbas, S.A., Xuan, Y., Song, X. (2019) Quantile Regression Based Methods for Investigating Rainfall Trends Associated with Flooding and Drought Conditions, *Water Resources Management*, vol. 33, pp. 4249-4264.

Anisimov, O., Kokorev, V.A. (2017) Cities of the Russian North in the Context of Climate Change, *Sustaining Russia's Arctic Cities: Resource Politics, Migration, and Climate Change*, in R. Ortung (ed.), New York, Berghahn Books, vol. 2, pp. 141-174.

Anisimov, O., Zimov, S. (2020) Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling, *Ambio*, ISSN 0044-7447, doi:10.1007/s13280-020-01392-y.

Bacer, S., Jomaa, F., Beaumet, J., Gallée, H., Le Bouëdec, E., Ménégot, M., Staquet, C. (2022) Impact of climate change on wintertime European atmospheric blocking, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 3, pp. 377-389, URL: <https://doi.org/10.5194/wcd-3-377-2022>.

Bender, F.A.-M., Ramanathan, V., Tselioudis, G. (2012) Changes in extratropical storm track cloudiness 1983-2008: Observational support for a

poleward shift, *Climate Dynamics*, vol. 38, pp. 2037-2053, doi:10.1007/s00382-011-1065-6.

Berghald, S., Blanchet, J., Blanc, A., Penot, D. (2025) Climatology and trends of observed daily and hourly extreme precipitation in the French Alps, *EGU sphere [preprint]*, URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3073>.

Bhikhari, T., Dhakal, N. (2020) On the use of Bayesian quantile regression method to explore the historical trends in extreme precipitation and their connections with large-scale climate patterns over the contiguous USA, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 139, pp. 1277-1290.

Binder, H., Wernli, H. (2025) Frequency anomalies and characteristics of extratropical cyclones during extremely wet, dry, windy, and calm seasons in the extratropics, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 6, pp. 151-170, URL: <https://doi.org/10.5194/wcd-6-151-2025>.

Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q. (2015) Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, vol. 28, pp. 6938-6959.

Chemke, R., Yuval, J. (2026) Climate change shifts the North Pacific storm track polewards, *Nature*, vol. 649(8097), pp. 626-630, URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09895-y>.

Chernokulsky, A.V., Kozlov, F.A., Zolina, O., Bulygina, O.N., Semenov, V.A. (2018) Climatology of precipitation of different genesis in Northern Eurasia, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 43(7), pp. 425-435.

Chernokulsky, A., Kurgansky, M., Mokhov, I., Shikhov, A., Azhigov, I., Selezneva, E., Zakharchenko, D., Antonescu, B., Kühne, T. (2020) Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era, *Monthly Weather Review*, vol. 148, no. 8, pp. 3081-3110, doi:10.1175/MWR-D-19-0251.1.

Chernokulsky, A., Shikhov, A., Bykov, A., Kalinin, N., Kurgansky, M., Sherstyukov, B., Yarinich, Yu. (2022) Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010, *Atmospheric Research*, vol. 267, p. 105928, doi:10.1016/j.atmosres.2021.105928.

Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P., Kew, S., Philip, S., van Oldenborgh, G.J., Skålevåg, A., Lorenz, P., Robin, Y., Otto, F., Hauser, M., Seneviratne, S.I., Lehner, F., Zolina, O. (2021) Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence, *Climatic Change*, vol. 166, no. 9, URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>.

Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Kwok, R., Overland, J., Ballinger, T.J., Bhatt, U.S., Chen, H.W., Coumou, D., Feldstein, S., Gu, H., Handorf, D., Henderson, G., Ionita, M., Kretschmer, M., Laliberte, F., Lee, S., Linderholm, H.W., Maslowski, W., Peings, Y., Pfeiffer, K., Rigor, I., Semmler, T., Stroeve, J., Taylor, P.C., Vavrus, S., Vihma, T., Wang, S., Wendisch, M., Wu, Y., Yoon, J. (2020) Divergent consensus on Arctic amplification influence on mid-latitude

---

severe winter weather, *Nature Climate Change*, vol. 10, pp. 20-29, URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>.

Cong, R.-G., Brady, M. (2022) *The Interdependence between Rainfall and Temperature: Copula Analyses*, URL: <https://mpira.ub.uni-muenchen.de/112149/> MPRA, Paper no. 112149, posted 07 Mar 2022.

Dai, A., Zhao, T., Chen, J. (2018) Climate Change and Drought: a Precipitation and Evaporation Perspective, *Current Climate Change Reports*, vol. 4, no. 3, pp. 301-312.

Ding, T., Gao, H., Li, X. (2024) Increasing Risk of a “Hot Eastern-Pluvial Western” Asia, *Earth’s Future*, vol. 12, no. 5, URL: <https://doi.org/10.1029/2023EF004333>.

Dosio, A., Mentaschi, L., Fischer, E.M., Wyser, K. (2018) Extreme heat waves under 1.5°C and 2°C global warming, *Environmental Research Letters*, vol. 13, 054006, URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab827>.

Doswell, C.A., Brooks, H.E., Maddox, R.A. (2001) Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology, *Weather and Forecasting*, vol. 16, no. 4, pp. 585-594.

Emanuel, K. (2020) Evidence that hurricanes are getting stronger, *Proceedings of Natural Academy of Sciences U.S.A.*, vol. 117, no. 24, pp. 13194-13195, URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2007742117>.

Fan, L. (2014) Quantile Trends in Temperature Extremes in China, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 304-308.

Fang, B., Bevacqua, E., Rakovec, O., Zscheischler, J. (2024) An increase in the spatial extent of European floods over the last 70 years, *Hydrological Earth System Science*, vol. 28, pp. 3755-3775, URL: <https://doi.org/10.5194/hess-28-3755-2024>, 2024.

Frolova, N.L., Kireeva, M.B., Magrickiy, D.V., Bologov, M.B., Kopylov, V.N., Hall, J., Semenov, V.A., Kosolapov, A.E., Dorozhkin, E.V., Korobkina, E.A., Rets, E.P., Akutina, Y., Djamalov, R.G., Efremova, N.A., Sazonov, A.A., Agafonova, S.A., Belyakova, P.A. (2017) Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment, *Natural Hazards*, vol. 88, pp. 103-131.

Fu, S.-M., Ma, H., Jiang, L.-J. (2024) Increasing risks of the explosive extratropical cyclones over the North Atlantic storm track: a perspective from their surface wind maxima, *Environmental Research Letters*, vol. 19, 054009, doi:10.1088/1748-9326/ad3b24.

Gan, W., Guo, H., Cao, Y., Wang, W., Yao, N., Wang, Y., Maeyer, P.D. (2025) Spatiotemporal Evolution and Intensification of Extreme Precipitation Events in Mainland China from 1961 to 2022, *Remote Sensing*, vol. 17, 2037, URL: <https://doi.org/10.3390/rs17122037>.

Gao, M., Franzke, C. (2017) Quantile regression-based spatio-temporal analysis of extreme temperature change in China, *Journal of Climate*, vol. 30, pp. 9897-9914.

Gudmundsson, L., Brunner, M.I., Döll, P., Fluet-Chouinard, E., Frolova, N., Gosling, S.N., Hirabayashi, Y., Kireeva, M.B., Liu, X., Müller Schmied, H., Magritskiy, D., Slater, L.J., Stein, L., Tramblay, I., Wang, K., Wasko, C., Yamazaki, D., Zhou, X. (2026) Past and future change in global river flows, *Nature Review Earth and Environment*, vol. 7, pp. 7-23, URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00745-z>.

Gummadi, S., Samineni, S., Lopez-Lavalle, L.A.B. (2025) Assessing high-resolution precipitation extremes in Central Asia: evaluation and future projections, *Climatic Change*, vol. 178, no. 29, URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-025-03872-0>.

Gritsun, A., Volodin, E., Bragina, V., Tarasevich, M. (2024) Simulation of modern and future climate by INM-CM6M, *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, vol. 39, pp. 329-341, doi:10.1515/rnam-2024-0028.

Haugen, M., Stein, M., Moyer, E. (2018) Estimating Changes in Temperature Distributions in Large Ensemble of Climate Simulations Using Quantile Regression, *Journal of Climate*, vol. 31, pp. 8573-8588.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146(730), pp. 1999-2049, doi:<https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Hoover, D.L., Smith, W.K. (2025) The growing threat of multiyear droughts, *Science*, vol. 387, pp. 246-247, doi:10.1126/science.adu7419.

Hou, R., Zhang, W., Hu, S., Xu, R. (2025) Rapid Indian Ocean warming fuels more frequent extreme pre-flood season rainfall over southern China, *National Science Review*, vol. 12(10), doi:10.1093/nsr/nwaf298. PMID: 40933817; PMCID: PMC12418954.

Hsu, P.-C., Hsu, H.-H., Hong, H.-J., Chen, Y.-T. (2025) Subtropical warming enhances North Pacific midlatitude winter storm track activity in recent decades. – *NPJ Climate and Atmospheric Science*, vol. 8(1), doi:10.1038/s41612-025-01108-7.

Huang, J., Li, X., Tian, Y., Sun, J., Yang, Q., Yang, M., Wang, S. (2024) A novel evaluation method-based effect analysis of urbanization on extreme precipitation in Guangxi, South China, *Theoretical Applied Climatology*, vol. 155, pp. 5957-5971, doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-024-04992-w>.

IPCC (2012) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Field, C.B., V. Barros, T.F.

---

---

Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 582 p.

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*, in 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 p.

IPCC (2021) Annex VII: Glossary, in Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2215-2256, doi:10.1017/9781009157896.022.

IPCC (2023) *Sixth Assessment Report (AR6): Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change*, URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

Kharin, V., Flato, G., Zhang, X., Gilett, N., Zwiers, F., Anderson, K. (2018) Risks from Climate Extremes Change Differently from 1.5°C to 2.0°C Depending on Rarity, *Earth's Future*, vol. 6, no. 5, pp. 704-715.

Kim, Y.-H., Min, S.-K., Zhang, X., Sillmann, J., Sandstad, M. (2020) Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices, *Weather and Climate Extremes*, vol. 29, 100269.

Kislov, A., Matveeva, T. (2016) An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region, *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 6, pp. 205-223, doi:10.4236/acs.2016.62018.

Kjellsson, J. (2015) Weakening of the global atmospheric circulation with global warming, *Climate Dynamics*, vol. 45(3-4), pp. 975-988, doi:10.1007/s00382-014-2337-8.

Klotzbach, P.J., Wood, K.M., Schreck, III, C.J., Bowen, S.G., Patricola, C.M., Bell, M.M. (2022) Trends in Global Tropical Cyclone Activity: 1990-2021, *Geophysical Research Letters*, vol. 49 (6), doi:10.1029/2021GL095774.

Knutson, T., Camargo, S.J., Chan, J.C.L., Emanuel K., Ho, C.-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., Wu, L. (2020) Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 101, pp. E303-E322, doi:<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0194.1>.

---

Koenker, R., Bassett, G. Jr. (1978) Regression in Quantiles, *Econometrica*, vol. 46, no. 1, pp. 33-50.

Lausier, A.M., Shaleen, J. (2018) Diversity in global patterns of observed precipitation variability and change on river basin scales A conditional quantile approach, *Climatic Change*, vol. 149, pp. 261-275, doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-018-2225-z>.

Lewis, S.C., Perkins-Kirkpatrick, S.E., King, A.D. (2019) Approaches to attribution of extreme temperature and precipitation events using multi-model and single-member ensembles of general circulation models, *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, vol. 5, pp. 133-146, doi:<https://doi.org/10.5194/ascmo-5-133-2019>.

Li, Y., Fowler, H.J., Argüeso, D., Blenkinsop, S., Evans, J.P., Lenderink, G., Yan, X., Guerreiro, S.B., Lewis, E., Li, X. (2020) Strong Intensification of Hourly Rainfall Extremes by Urbanization, *Geophysical Research Letters*, doi:<https://doi.org/10.1029/2020GL088758>.

Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., Wehner, M. (2021) Changes in Annual Extremes of Daily Temperature and Precipitation in CMIP6 Models, *Journal of Climate*, vol. 34, no. 9, pp. 3441-3460.

Lin, L., Wang, Z., Xu, Y., Fu, Q. (2016) Sensitivity of precipitation extremes to radiative forcing of greenhouse gases and aerosols, *Geophysical Research Letters*, vol. 43, no. 18, pp. 9860-9868.

Li, G., Shi, H., He, Z. (2024) Trends and Periodicities of Tropical Cyclone Frequencies and the Correlations with Ocean Drivers, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, 1707, doi:<https://doi.org/10.3390/jmse12101707>.

Lohmann, R., Purr, C., Ahrens, B. (2024) Northern Hemisphere Atmospheric Blocking in CMIP6 Climate Projections Using a Hybrid Index, *Journal of Climate*, vol. 37, pp. 6605-6625, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0589.1>.

Lopez-Marti, F., Ginesta, M., Faranda, D., Rutgersson, A., Yiou, P., Wu, L., Messori, G. (2025) Future changes in compound explosive cyclones and atmospheric rivers in the North Atlantic, *Earth System Dynamics*, vol. 16, pp. 169-187, doi:<https://doi.org/10.5194/esd-16-169-2025>.

Luo, D., Chen, X., Dai, A., Simmonds, I. (2018) Changes in Atmospheric Blocking Circulations Linked with Winter Arctic Warming: A New Perspective, *Journal of Climate*, vol. 31, no. 18, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0040.1>

Manikanta, N.D, Joseph, S., Naidu, C.V. (2023) Recent global increase in multiple rapid intensification of tropical cyclones, *Scientific Reports*, vol. 13(1), 15949, doi:[10.1038/s41598-023-43290-9](https://doi.org/10.1038/s41598-023-43290-9).

Mazdiyasi, O., Mojtaba, S.M., Chiang, F., Kouchak, A.A. (2019) Heat wave Intensity Duration Frequency Curve: A Multivariate Approach for Hazard and Attribution Analysis, *Nature, Scientific Reports*, vol. 9, 14117, doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-50643-w>.

---

Myslenkov, S., Medvedeva, A., Arkhipkin, V., Markina, M., Surkova, G., Krylov, A., Dobrolyubov, S., Zilitinkevich, S., Koltermann, P. (2018) Long-term statistics of storms in the Baltic, Barents and White seas and their future climate projections, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 11, no. 1, pp. 93-112.

OECD (2025) *Global Drought Outlook: Trends, Impacts and Policies to Adapt to a Drier World*, OECD Publishing, Paris, URL: <https://doi.org/10.1787/d492583a-en>.

Oruc, S. (2021) Quantile trends of subhourly extreme rainfall: Marmara Region Turkey, *Acta Geophysica*, vol. 69, pp. 2453-2473, doi:<https://doi.org/10.1007/s11600-021-00692-5>.

Petry, I., Miranda, P.T., Paiva, R.C.D., Collischonn, W., Fan, F.M., Fagundes, H.O., Araujo, A.A., Souza, S. (2025) Changes in Flood Magnitude and Frequency Projected for Vulnerable Regions and Major Wetlands of South America, *Geophysical Research Letters*, vol. 52(5), doi:<https://doi.org/10.1029/2024GL112436>.

Platonov, V., Kislov, A. (2020) High-Resolution COSMO-CLM Modeling and an Assessment of Mesoscale Features Caused by Coastal Parameters at Near-Shore Arctic Zones (Kara Sea), *Atmosphere*, vol. 11, 1062, doi:<https://doi.org/10.3390/atmos11101062>.

Rahman, M.S., Senkbeil, J.C., Keellings, D.J. (2023) Spatial and Temporal Variability of Extreme Precipitation Events in the Southeastern United States, *Atmosphere*, vol. 14, 1301, doi:<https://doi.org/10.3390/atmos14081301>.

Raei, E., Nikoo, M.R., AghaKouchak, A., Mazdidasni, O., Sadegh, M. (2018) GHWR, a multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox, *Scientific Data*, vol. 5, 180206, doi:10.1038/sdata.2018.206.

Revich, B.A., Shaposhnikov, D.A. (2017) Influence features of cold and heat waves to the population mortality – the city with sharply continental climate, *Siberian Medical Review*, vol. 2, pp. 84-90, doi:10.20333/2500136-2017-2-84-90.

Smith, S.L., O'Neill, H.B., Isaksen, K., Noetzli, J., Romanovsky, V.E. (2022) The changing thermal state of permafrost, *Nature Reviews Earth and Environment*, vol. 3(1), pp. 10-23, doi:<https://www.nature.com/articles/s43247-026-03189-5>.

Schemm, S., Papritz, L., Rivière, G. (2022) Storm track response to uniform global warming downstream of an idealized sea surface temperature front, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 3, pp. 601-623, doi:<https://doi.org/10.5194/wcd-3-601-2022>.

Schölzel, C., Friederichs, P. (2008) Multivariate non-normally distributed random variables in climate research – introduction to the copula approach, *Nonlinear Processes Geophysics*, vol. 15, pp. 761-772, doi:[www.nonlin-processes-geophys.net/15/761/2008](http://www.nonlin-processes-geophys.net/15/761/2008).

Shahi, N.K., Zolina, O., Gulev, S.K. (2025) Process-based understanding of spatio-temporal variability of precipitation over Europe: insights from high-

resolution climate model simulations, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 26(2), pp. 221-238, doi:<https://doi.org/10.1175/JHM-D-24-0035.1>.

Senatore, A., Furnari, L., Nikravesh, G., Castagna, J., Mendicino, G. (2025) Increasing Daily Extreme and Declining Annual Precipitation in Southern Europe: A Modeling Study on the Effects of Mediterranean Warming, *EGUsphere [preprint]*, URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1567>.

Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S.M., Wehner, M., Zhou, B. (2021) Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, Leitzell, K., E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513-1766, doi:10.1017/9781009157896.013.

Sukhanovskii, A., Gavrilov, A., Popova, E., Vasiliev, A. (2024) The impact of polar warming on global atmospheric circulation and mid-latitude baroclinic waves, *EGUsphere [preprint]*, URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2797>.

Noyelle, R., Faranda, D., Robin, Y., Vrac, M., Yiou, P. (2025) Attributing the occurrence and intensity of extreme events with the flow analogue method, *Weather Climate Dynamics*, vol. 6, pp. 817-839, doi:<https://doi.org/10.5194/wcd-6-817-2025>.

Passow, C., Donner, R. (2019) A Rigorous Statistical Assessment of Recent Trends in Intensity of Heavy Precipitation Over Germany, *Frontiers in Environmental Science*, vol. 7, no. 143, doi:<https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00143>.

Rasmussen, K.L., Prein, A.F., Rasmussen, R.M., Ikeda, K., Liu, C. (2020) Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States, *Climate Dynamics*, vol. 55, no. 1-2, pp. 383-408.

Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F., Westra, S., Alexander, L. (2020) A Global, Continental, and Regional Analysis of Changes in Extreme Precipitation, *Journal of Climate*, vol. 34(1), doi:10.1175/JCLI-D-19-0892.1.

Tamarin, T., Kaspi, Y. (2017) The poleward shift of storm tracks under global warming: A Lagrangian perspective, *Geophysical Research Letters*, vol. 44(20), pp. 10666-10674, URL: <https://doi.org/10.1002/2017GL073633>.

Tavakol, A., Rahmani, V., Harrington, J. (2020) Probability of compound climate extremes in a changing climate: A copula-based study of hot, dry, and windy events in the central United States, *Environmental Research Letters*, vol. 15, 104058, doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb1ef>.

---

Tedesco, P., Lenkoski, A., Bloomfield, H.C., Sillmann, J. (2023) Gaussian copula modeling of extreme cold and weak-wind events over Europe conditioned on winter weather regimes, *Environmental Research Letters*, vol. 18, 034008, URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb6aa>.

Terray, L. (2021) A dynamical adjustment perspective on extreme event attribution, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 2, pp. 971-989, doi:<https://doi.org/10.5194/wcd-2-971-2021>.

Tramblay, Y., Thirel, G., Strohmenger, L., Evin, G., Corre, L., Heraut, L., Sauquet, E. (2025) Evolution of flood generating processes under climate change in France, *EGUsphere [preprint]*, URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1635>.

UNEP (2022) *Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires*.

Willems, P., Vrac, M. (2011) Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change, *Journal of Hydrology*, vol. 402, pp. 193-205.

WMO-TD 1500 (2009) *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*, WMO-TD 1500, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72, 55 p.

WMO-№ 1137 (2014) *Commission for Climatology Sixteenth session, Heidelberg, 3-8 July 2014, Abridged final report with resolutions and recommendations*, WMO-№ 1137, 68 p.

WMO (2021) *Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events*, World Meteorological Organization, URL: <https://library.wmo.int>.

Volodin, E.M., Yurova, A.Y. (2013) Summer temperature standard deviation, skewness and strong positive temperature anomalies in the present-day climate and under global warming conditions, *Climate Dynamics*, vol. 40, pp. 1387-1398.

Xuan, Y., Abbas, S.A., Song, X., Reeve, D.E. (2017) Quantile regression-based method for investigating rainfall trends associated with flooding and drought conditions, *European Water*, vol. 59, pp. 137-143.

Yang, C., Li, L., Xu, J. (2017) Changing temperature extremes based on CMIP5 output via semi-parametric quantile regression approach, *International Journal of Climatology*, vol. 38, No 8.

Yu, L. (2019) Global Air–Sea Fluxes of Heat, Fresh Water, and Momentum: Energy Budget Closure and Unanswered Questions, *Annual Review of Marine Science*, vol. 11, doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060704>.

Zappa, G., Shaffrey, L.C., Hodges, K.I., Sansom, P.G., Stephenson, D.B. (2013) A Multimodel Assessment of Future Projections of North Atlantic and European Extratropical Cyclones in the CMIP5 Climate Models, *Journal of Climate*, vol. 26, no. 16, pp. 5846-5862.

---

Zhao, K., Zhao, H., Coupe, J., Klotzbach, P., Wu L. (2024) Simulating the Response of Tropical Cyclones to Potential Nuclear War, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 129 (29), doi:<https://doi.org/10.1029/2024JD041658>.

Zheng, Y., Xue, M., Li, B., Chen, J., Tao, Z. (2016) Spatial Characteristics of Extreme Rainfall over China with Hourly through 24-Hour Accumulation Periods Based on National-Level Hourly Rain Gauge Data, *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 33, pp. 1218-1232.

## References

Babina, E., Semenov, V. (2022) Izmeneniya intensivnosti kolebanij sutochnoj temperatury vozduha v diapazonah vnutrimesyachnoj izmenchivosti na territorii Rossii v 1970-2018 gg. [Changes in the intensity of daily air temperature fluctuations in the ranges of intra-monthly variability in Russia in 1970-2018], *Izvestiya RAN. Geografiya*, vol. 86, no. 4, pp. 528-546.

Bolgov, M.V. (2012) Sovremennoe sostoyanie teorii korrelyacii dlya gidrologicheskikh raschetov i stohasticheskogo modelirovaniya [Current state of correlation theory for hydrological calculations and stochastic modeling], *Vodnoe hozyajstvo Rossii* [Water Management of Russia], no. 4, pp. 7-20.

WMO-No. 1157 (2015) *Semnadcatyj Vsemirnyj meteorologicheskij kongress: Sokrashchennyj okonchatel'nyj otchet s rezolyuciyami* [Seventeenth World Meteorological Congress: Abridged Final Report with Resolutions], Geneva.

WMO-No. 1203 (2017) *Rukovodyashchie ukazaniya VMO po raschetu klimaticheskikh norm WMO* [Guidelines for the Calculation of Climate Normals], 21 p.

Volodin, E., Tarasevich, M. (2018) Vosproizvedenie indeksov pogodno-klimaticheskoy ekstremal'nosti klimaticheskoy model'yu IVM RAN [Reproduction of weather-climate extreme indices by the INM RAS climate model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 11, pp. 68-76.

Kislov, A.V., Evstigneev, V.M., Malkhazova, S.M., Surkova, G.V., Toropov, P.A., Chernyshev, A.V., Chumachenko, A.N. (2008) *Prognoz klimaticheskoy resursoobespechennosti vostochno-evropejskaj ravniny v usloviyah potepleniya XXI veka* [Forecast of Climatic Resource Availability of the East European Plain under 21<sup>st</sup> Century Warming Conditions], Max-Press, Moscow, Russia, 290 p.

Kislov, A.V., Rivin, G.S., Platonov, V.S., Varentsov, M.I., Rozinkina, I.A., Nikitin, M.A., Chumakov, M.M. (2018) Mezomasshtabnoe modelirovanie ekstremal'nyh vetrov nad Ohotskim morem i ostrovom Sahalin [Mesoscale Modeling of Extreme Winds over the Sea of Okhotsk and Sakhalin Island], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 54, no. 4, pp. 381-385.

Kislov, A.V., Antipina, U.I., Korneva, N.A. (2021) Ekstremal'nye osadki Evropejskogo sektora Arktiki v letnij period: statistika i sinopticheskie modeli [Extreme Precipitation in the European Arctic in Summer: Statistics and Synoptic Models], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 20-34.

---

Korshunova, N.N., Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N., Davletshin, S.G. (2018) Ocenki ekstremal'nosti temperaturnogo rezhima i rezhima osadkov dlya territorii RF i ee regionov [Estimates of the Extreme Temperature and Precipitation Regime for the Territory of the Russian Federation and its Regions], *Trudy VNIIGMI-MCD* [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Surveys (VNIIGMI-WCD)], issue 183, pp. 20-30.

Korshunova, N.N., Davletshin, S.G. (2021) Izmenenie indeksov ekstremal'nosti na territorii Rossii [Changes in Extreme Indices on the Territory of Russia], *Trudy VNIIGMI-MCD* [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Surveys (VNIIGMI-WCD)], issue 189, pp. 116-127.

Korshunova, N.N., Shvets, N.V. (2023) Regional'nye osobennosti izmeneniya norm osnovnykh klimaticheskikh parametrov na territorii Rossii [Regional Features of Changes in Normal Standards of the Main Climatic Parameters in Russia], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasts], issue 387, pp. 131-147.

Kruglova, E.N., Kulikova, I.A., Tishchenko, V.A., Khan, V.M. (2019) Prognozirovanie voln tepla na vnutrisesonnykh masshtabah vremeni [Forecasting Heat Waves on Intra-Seasonal Time Scales], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasts], issue 371, pp. 95-108.

Lavrov, A.S., Sterin, A.M. (2024) Detalizaciya klimaticheskikh trendov temperatury i osadkov na territorii RF s ispol'zovaniem kvantil'noj regressii i klasterizacii [Detailing Climate Trends of Temperature and Precipitation in the Russian Federation Using Quantile Regression and Clustering], *Fundamental'naya prikladnaya klimatologiya*, vol. 10, no. 2, pp. 219-243, doi:10.21513/0207-2564-2024-2-219-243.

IPCC (2012) *Rezyume dlya politikov Special'nogo doklada po upravleniyu riskami ekstremal'nykh yavlenij i bedstvij dlya sodejstviya adaptacii k izmeneniyu klimata* [Summary for Policymakers of the Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Adaptation to Climate Change], in Field, K.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Eby, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, J.-C. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P. Midgley (eds.), Special Reports of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 19 pp.

Revici, B.A. (2017) Volny zhary v megapolisah i porogi ih vozdejstviya na smertnost' naseleniya [Heat waves in megacities and thresholds of their impact on population mortality], *Gigiena i sanitariya*, vol. 96(11), pp. 1073-1078, doi:http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11-1073-1078.

Rozhkov, V.A. (2001) *Teoriya i metody statisticheskogo ocenivaniya veroyatnostnykh charakteristik sluchajnykh velichin i funkcij s gidrometeorologicheskimi primerami* [Theory and Methods of Statistical Estimation of Probability

Characteristics of Random Variables and Functions with Hydrometeorological Examples], vol. 1, Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Russia, 340 p.

Roshydromet (2020) *Klimat Rossii. Osobennosti ekstremal'nyh pogodnyh yavlenij* [The Climate of Russia. Features of Extreme Weather Events], URL: <https://meteoinfo.ru>.

*Rukovodstvo po specializirovannomu obsluzhivaniyu ekonomiki klimaticheskoj informaciej, produkciej i uslugami* [Guide to Specialized Maintenance of the Economy with Climate Information, Products, and Services] (2008) Edited by Doctor of Geographical Sciences, Professor N.V. Kobysheva, St. Petersburg, Russia, 336 p.

Sterin, A.M., Timofeev, A.A. (2016) Ob ocenke trendov prizemnoj temperatury vozduha dlya territorii Rossii metodom kvantil'noj regressii [On the Assessment of Surface Air Temperature Trends for the Territory of Russia Using the Quantile Regression Method], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 17-30.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2022) Ispol'zovanie kvantil'noj regressii dlya ocenki prostranstvennyh osobennostej harakteristik trendov prizemnoj temperatury na territorii Rossii [Using quantile regression to assess spatial features of surface temperature trend characteristics in Russia], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 2, pp. 92-111.

Taleb, N.N. (2023) *Statisticheskie posledstviya zhirnyh hvostov* [Statistical consequences of fat tails], KoLibri, Moscow, Russia, 480 p.

Cherenkova, E.A., Georgiadi, A.G., Zolotokrylin, A.N., Kashutina E.A. (2024) Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata na Vostochno-Evropejskoj ravnine i ih vliyanie na rechnoj stok (na primere Dona) [Observed and expected climate changes on the East European Plain and their impact on river runoff (using the Don River as an example)], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Geographical series], vol. 88, no. 3, pp. 349-364, doi:10.31857/S2587556624030075.

Abbas, S.A., Xuan, Y., Song, X. (2019) Quantile Regression Based Methods for Investigating Rainfall Trends Associated with Flooding and Drought Conditions, *Water Resources Management*, vol. 33, pp. 4249-4264.

Anisimov, O., Kokorev, V.A. (2017) Cities of the Russian North in the Context of Climate Change, *Sustaining Russia's Arctic Cities: Resource Politics, Migration, and Climate Change*, in R. Ortting (ed.), New York, Berghahn Books, vol. 2, pp. 141-174.

Anisimov, O., Zimov, S. (2020) Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling, *Ambio*, ISSN 0044-7447, doi:10.1007/s13280-020-01392-y.

Bacer, S., Jomaa, F., Beaumet, J., Gallée, H., Le Bouëdec, E., Ménégoz, M., Staquet, C. (2022) Impact of climate change on wintertime European atmospheric blocking, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 3, pp. 377-389, URL: <https://doi.org/10.5194/wcd-3-377-2022>.

---

Bender, F.A.-M., Ramanathan, V., Tselioudis, G. (2012) Changes in extratropical storm track cloudiness 1983-2008: Observational support for a poleward shift, *Climate Dynamics*, vol. 38, pp. 2037-2053, doi:10.1007/s00382-011-1065-6.

Berghald, S., Blanchet, J., Blanc, A., Penot, D. (2025) Climatology and trends of observed daily and hourly extreme precipitation in the French Alps, *EGUsphere [preprint]*, URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3073>.

Bhikhari, T., Dhakal, N. (2020) On the use of Bayesian quantile regression method to explore the historical trends in extreme precipitation and their connections with large-scale climate patterns over the contiguous USA, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 139, pp. 1277-1290.

Binder, H., Wernli, H. (2025) Frequency anomalies and characteristics of extratropical cyclones during extremely wet, dry, windy, and calm seasons in the extratropics, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 6, pp. 151-170, URL: <https://doi.org/10.5194/wcd-6-151-2025>.

Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q. (2015) Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, vol. 28, pp. 6938-6959.

Chemke, R., Yuval, J. (2026) Climate change shifts the North Pacific storm track polewards, *Nature*, vol. 649(8097), pp. 626-630, URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09895-y>.

Chernokulsky, A.V., Kozlov, F.A., Zolina, O., Bulygina, O.N., Semenov, V.A. (2018) Climatology of precipitation of different genesis in Northern Eurasia, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 43(7), pp. 425-435.

Chernokulsky, A., Kurgansky, M., Mokhov, I., Shikhov, A., Azhigov, I., Selezneva, E., Zakharchenko, D., Antonescu, B., Kühne, T. (2020) Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era, *Monthly Weather Review*, vol. 148, no. 8, pp. 3081-3110, doi:10.1175/MWR-D-19-0251.1.

Chernokulsky, A., Shikhov, A., Bykov, A., Kalinin, N., Kurgansky, M., Sherstyukov, B., Yarinich, Yu. (2022) Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010, *Atmospheric Research*, vol. 267, p. 105928, doi:10.1016/j.atmosres.2021.105928.

Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P., Kew, S., Philip, S., van Oldenborgh, G.J., Skålevåg, A., Lorenz, P., Robin, Y., Otto, F., Hauser, M., Seneviratne, S.I., Lehner, F., Zolina, O. (2021) Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence, *Climatic Change*, vol. 166, no. 9, URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>.

Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Kwok, R., Overland, J., Ballinger, T.J., Bhatt, U.S., Chen, H.W., Coumou, D., Feldstein, S., Gu, H., Handorf, D., Henderson, G., Ionita, M., Kretschmer, M., Laliberte, F., Lee, S., Linderholm, H.W., Maslowski, W., Peings, Y., Pfeiffer, K., Rigor, I., Semmler, T., Stroeve, J.,

---

Taylor, P.C., Vavrus, S., Vihma, T., Wang, S., Wendisch, M., Wu, Y., Yoon, J. (2020) Divergent consensuses on Arctic amplification influence on mid-latitude severe winter weather, *Nature Climate Change*, vol. 10, pp. 20-29, URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>.

Cong, R.-G., Brady, M. (2022) *The Interdependence between Rainfall and Temperature: Copula Analyses*, URL: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/112149/> MPRA, Paper no. 112149, posted 07 Mar 2022.

Dai, A., Zhao, T., Chen, J. (2018) Climate Change and Drought: a Precipitation and Evaporation Perspective, *Current Climate Change Reports*, vol. 4, no. 3, pp. 301-312.

Ding, T., Gao, H., Li, X. (2024) Increasing Risk of a “Hot Eastern-Pluvial Western” Asia, *Earth’s Future*, vol. 12, no. 5, URL: <https://doi.org/10.1029/2023EF004333>.

Dosio, A., Mentaschi, L., Fischer, E.M., Wyser, K. (2018) Extreme heat waves under 1.5°C and 2°C global warming, *Environmental Research Letters*, vol. 13, 054006, URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab827>.

Doswell, C.A., Brooks, H.E., Maddox, R.A. (2001) Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology, *Weather and Forecasting*, vol. 16, no. 4, pp. 585-594.

Emanuel, K. (2020) Evidence that hurricanes are getting stronger, *Proceedings of Natural Academy of Sciences U.S.A.*, vol. 117, no. 24, pp. 13194-13195, URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2007742117>.

Fan, L. (2014) Quantile Trends in Temperature Extremes in China, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 304-308.

Fang, B., Bevacqua, E., Rakovec, O., Zscheischler, J. (2024) An increase in the spatial extent of European floods over the last 70 years, *Hydrological Earth System Science*, vol. 28, pp. 3755-3775, URL: <https://doi.org/10.5194/hess-28-3755-2024>, 2024.

Frolova, N.L., Kireeva, M.B., Magrickiy, D.V., Bologov, M.B., Kopylov, V.N., Hall, J., Semenov, V.A., Kosolapov, A.E., Dorozhkin, E.V., Korobkina, E.A., Rets, E.P., Akutina, Y., Djmalov, R.G., Efremova, N.A., Sazonov, A.A., Agafonova, S.A., Belyakova, P.A. (2017) Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment, *Natural Hazards*, vol. 88, pp. 103-131.

Fu, S.-M., Ma, H., Jiang, L.-J. (2024) Increasing risks of the explosive extratropical cyclones over the North Atlantic storm track: a perspective from their surface wind maxima, *Environmental Research Letters*, vol. 19, 054009, doi:10.1088/1748-9326/ad3b24.

Gan, W., Guo, H., Cao, Y., Wang, W., Yao, N., Wang, Y., Maeyer, P.D. (2025) Spatiotemporal Evolution and Intensification of Extreme Precipitation Events in Mainland China from 1961 to 2022, *Remote Sensing*, vol. 17, 2037, URL: <https://doi.org/10.3390/rs17122037>.

---

---

Gao, M., Franzke, C. (2017) Quantile regression-based spatio-temporal analysis of extreme temperature change in China, *Journal of Climate*, vol. 30, pp. 9897-9914.

Gudmundsson, L., Brunner, M.I., Döll, P., Fluet-Chouinard, E., Frolova, N., Gosling, S.N., Hirabayashi, Y., Kireeva, M.B., Liu, X., Müller Schmied, H., Magritskiy, D., Slater, L.J., Stein, L., Trambly, I., Wang, K., Wasko, C., Yamazaki, D., Zhou, X. (2026) Past and future change in global river flows, *Nature Review Earth and Environment*, vol. 7, pp. 7-23, URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00745-z>.

Gummadi, S., Samineni, S., Lopez-Lavalle, L.A.B. (2025) Assessing high-resolution precipitation extremes in Central Asia: evaluation and future projections, *Climatic Change*, vol. 178, no. 29, URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-025-03872-0>.

Gritsun, A., Volodin, E., Bragina, V., Tarasevich, M. (2024) Simulation of modern and future climate by INM-CM6M, *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, vol. 39. pp. 329-341, doi:10.1515/rnam-2024-0028.

Haugen, M., Stein, M., Moyer, E. (2018) Estimating Changes in Temperature Distributions in Large Ensemble of Climate Simulations Using Quantile Regression, *Journal of Climate*, vol. 31, pp. 8573-8588.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146(730), pp. 1999-2049, doi:<https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Hoover, D.L., Smith, W.K. (2025) The growing threat of multiyear droughts, *Science*, vol. 387, pp. 246-247, doi:10.1126/science.adu7419.

Hou, R., Zhang, W., Hu, S., Xu, R. (2025) Rapid Indian Ocean warming fuels more frequent extreme pre-flood season rainfall over southern China, *National Science Review*, vol. 12(10), doi:10.1093/nsr/nwaf298. PMID: 40933817; PMCID: PMC12418954.

Hsu, P.-C., Hsu, H.-H., Hong, H.-J., Chen, Y.-T. (2025) Subtropical warming enhances North Pacific midlatitude winter storm track activity in recent decades. – *NPJ Climate and Atmospheric Science*, vol. 8(1), doi:10.1038/s41612-025-01108-7.

Huang, J., Li, X., Tian, Y., Sun, J., Yang, Q., Yang, M., Wang, S. (2024) A novel evaluation method-based effect analysis of urbanization on extreme precipitation in Guangxi, South China, *Theoretical Applied Climatology*, vol. 155, pp. 5957-5971, doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-024-04992-w>.

IPCC (2012) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, A Special Report of Working Groups I and II

---

of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 582 p.

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*, in 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 p.

IPCC (2021) Annex VII: Glossary, in Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2215-2256, doi:10.1017/9781009157896.022.

IPCC (2023) *Sixth Assessment Report (AR6): Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change*, URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

Kharin, V., Flato, G., Zhang, X., Gilett, N., Zwiers, F., Anderson, K. (2018) Risks from Climate Extremes Change Differently from 1.5°C to 2.0°C Depending on Rarity, *Earth's Future*, vol. 6, no. 5, pp. 704-715.

Kim, Y.-H., Min, S.-K., Zhang, X., Sillmann, J., Sandstad, M. (2020) Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices, *Weather and Climate Extremes*, vol. 29, 100269.

Kislov, A., Matveeva, T. (2016) An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region, *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 6, pp. 205-223, doi:10.4236/acs.2016.62018.

Kjellsson, J. (2015) Weakening of the global atmospheric circulation with global warming, *Climate Dynamics*, vol. 45(3-4), pp. 975-988, doi:10.1007/s00382-014-2337-8.

Klotzbach, P.J., Wood, K.M., Schreck, III, C.J., Bowen, S.G., Patricola, C.M., Bell, M.M. (2022) Trends in Global Tropical Cyclone Activity: 1990-2021, *Geophysical Research Letters*, vol. 49(6), doi:10.1029/2021GL095774.

Knutson, T., Camargo, S.J., Chan, J.C.L., Emanuel K., Ho, C.-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., Wu, L. (2020) Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 101, pp. E303-E322, doi:<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0194.1>.

---

Koenker, R., Bassett, G.Jr. (1978) Regression in Quantiles, *Econometrica*, vol. 46, no. 1, pp. 33-50.

Lausier, A.M., Shaleen, J. (2018) Diversity in global patterns of observed precipitation variability and change on river basin scales A conditional quantile approach, *Climatic Change*, vol. 149, pp. 261-275, doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-018-2225-z>.

Lewis, S.C., Perkins-Kirkpatrick, S.E., King, A.D. (2019) Approaches to attribution of extreme temperature and precipitation events using multi-model and single-member ensembles of general circulation models, *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, vol. 5, pp. 133-146, doi:<https://doi.org/10.5194/ascmo-5-133-2019>.

Li, Y., Fowler, H.J., Argüeso, D., Blenkinsop, S., Evans, J.P., Lenderink, G., Yan, X., Guerreiro, S.B., Lewis, E., Li, X. (2020) Strong Intensification of Hourly Rainfall Extremes by Urbanization, *Geophysical Research Letters*, doi:<https://doi.org/10.1029/2020GL088758>.

Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., Wehner, M. (2021) Changes in Annual Extremes of Daily Temperature and Precipitation in CMIP6 Models, *Journal of Climate*, vol. 34, no. 9, pp. 3441-3460.

Lin, L., Wang, Z., Xu, Y., Fu, Q. (2016) Sensitivity of precipitation extremes to radiative forcing of greenhouse gases and aerosols, *Geophysical Research Letters*, vol. 43, no. 18, pp. 9860-9868.

Li, G., Shi, H., He, Z. (2024) Trends and Periodicities of Tropical Cyclone Frequencies and the Correlations with Ocean Drivers, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, 1707, doi:<https://doi.org/10.3390/jmse12101707>.

Lohmann, R., Purr, C., Ahrens, B. (2024) Northern Hemisphere Atmospheric Blocking in CMIP6 Climate Projections Using a Hybrid Index, *Journal of Climate*, vol. 37, pp. 6605-6625, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0589.1>.

Lopez-Marti, F., Ginesta, M., Faranda, D., Rutgersson, A., Yiou, P., Wu, L., Messori, G. (2025) Future changes in compound explosive cyclones and atmospheric rivers in the North Atlantic, *Earth System Dynamics*, vol. 16, pp. 169-187, doi:<https://doi.org/10.5194/esd-16-169-2025>.

Luo, D., Chen, X., Dai, A., Simmonds, I. (2018) Changes in Atmospheric Blocking Circulations Linked with Winter Arctic Warming: A New Perspective, *Journal of Climate*, vol. 31, no. 18, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0040.1>.

Manikanta, N.D, Joseph, S., Naidu, C.V. (2023) Recent global increase in multiple rapid intensification of tropical cyclones, *Scientific Reports*, vol. 13(1), 15949, doi:[10.1038/s41598-023-43290-9](https://doi.org/10.1038/s41598-023-43290-9).

Mazdiyasni, O., Mojtaba, S.M., Chiang, F., Kouchak, A.A. (2019) Heat wave Intensity Duration Frequency Curve: A Multivariate Approach for Hazard and Attribution Analysis, *Nature, Scientific Reports*, vol. 9, 14117, doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-50643-w>.

---

Myslenkov, S., Medvedeva, A., Arkhipkin, V., Markina, M., Surkova, G., Krylov, A., Dobrolyubov, S., Zilitinkevich, S., Koltermann, P. (2018) Long-term statistica of storms in the Baltic, Barents and White seas and their future climate projections, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 11, no. 1, pp. 93-112.

OECD (2025) *Global Drought Outlook: Trends, Impacts and Policies to Adapt to a Drier World*, OECD Publishing, Paris, URL: <https://doi.org/10.1787/d492583a-en>.

Oruc, S. (2021) Quantile trends of subhourly extreme rainfall: Marmara Region Turkey, *Acta Geophysica*, vol. 69, pp. 2453-2473, doi:<https://doi.org/10.1007/s11600-021-00692-5>.

Petry, I., Miranda, P.T., Paiva, R.C.D., Collischonn, W., Fan, F.M., Fagundes, H.O., Araujo, A.A., Souza, S. (2025) Changes in Flood Magnitude and Frequency Projected for Vulnerable Regions and Major Wetlands of South America, *Geophysical Research Letters*, vol. 52(5), doi:<https://doi.org/10.1029/2024GL112436>.

Platonov, V., Kislov, A. (2020) High-Resolution COSMO-CLM Modeling and an Assessment of Mesoscale Features Caused by Coastal Parameters at Near-Shore Arctic Zones (Kara Sea), *Atmosphere*, vol. 11, 1062, doi:<https://doi.org/10.3390/atmos11101062>.

Rahman, M.S., Senkbeil, J.C., Keellings, D.J. (2023) Spatial and Temporal Variability of Extreme Precipitation Events in the Southeastern United States, *Atmosphere*, vol. 14, 1301, doi:<https://doi.org/10.3390/atmos14081301>.

Raei, E., Nikoo, M.R., AghaKouchak, A., Mazdiyasni, O., Sadegh, M. (2018) GHWR, a multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox, *Scientific Data*, vol. 5, 180206, doi:[10.1038/sdata.2018.206](https://doi.org/10.1038/sdata.2018.206).

Revich, B.A., Shaposhnikov, D.A. (2017) Influence features of cold and heat waves to the population mortality – the city with sharply continental climate, *Siberian Medical Review*, vol. 2, pp. 84-90, doi: [10.20333/2500136-2017-2-84-90](https://doi.org/10.20333/2500136-2017-2-84-90).

Smith, S.L., O'Neill, H.B., Isaksen, K., Noetzli, J., Romanovsky, V.E. (2022) The changing thermal state of permafrost, *Nature Reviews Earth and Environment*, vol. 3(1), pp. 10-23, doi:<https://www.nature.com/articles/s43247-026-03189-5>.

Schemm, S., Papritz, L., Rivière, G. (2022) Storm track response to uniform global warming downstream of an idealized sea surface temperature front, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 3, pp. 601-623, doi:<https://doi.org/10.5194/wcd-3-601-2022>.

Schölzel, C., Friederichs, P. (2008) Multivariate non-normally distributed random variables in climate research – introduction to the copula approach, *Nonlinear Processes Geophysics*, vol. 15, pp. 761-772, doi:[www.nonlin-processes-geophys.net/15/761/2008](https://www.nonlin-processes-geophys.net/15/761/2008).

Shahi, N.K., Zolina, O., Gulev, S.K. (2025) Process-based understanding of spatio-temporal variability of precipitation over Europe: insights from high-

---

---

resolution climate model simulations, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 26(2), pp. 221-238, doi:<https://doi.org/10.1175/JHM-D-24-0035.1>.

Senatore, A., Furnari, L., Nikravesh, G., Castagna, J., Mendicino, G. (2025) Increasing Daily Extreme and Declining Annual Precipitation in Southern Europe: A Modeling Study on the Effects of Mediterranean Warming, *EGUsphere [preprint]*, URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1567>.

Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S.M., Wehner, M., Zhou, B. (2021) Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, Leitzell, K., E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513-1766, doi:10.1017/9781009157896.013.

Sukhanovskii, A., Gavrilov, A., Popova, E., Vasiliev, A. (2024) The impact of polar warming on global atmospheric circulation and mid-latitude baroclinic waves, *EGUsphere [preprint]*, URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2797>.

Noyelle, R., Faranda, D., Robin, Y., Vrac, M., Yiou, P. (2025) Attributing the occurrence and intensity of extreme events with the flow analogue method, *Weather Climate Dynamics*, vol. 6, pp. 817-839, doi:<https://doi.org/10.5194/wcd-6-817-2025>.

Passow, C., Donner, R. (2019) A Rigorous Statistical Assessment of Recent Trends in Intensity of Heavy Precipitation Over Germany, *Frontiers in Environmental Science*, vol. 7, no. 143, doi:<https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00143>.

Rasmussen, K.L., Prein, A.F., Rasmussen, R.M., Ikeda, K., Liu, C. (2020) Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States, *Climate Dynamics*, vol. 55, no. 1-2, pp. 383-408.

Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F., Westra, S., Alexander, L. (2020) A Global, Continental, and Regional Analysis of Changes in Extreme Precipitation, *Journal of Climate*, vol. 34(1), doi:10.1175/JCLI-D-19-0892.1.

Tamarin, T., Kaspi, Y. (2017) The poleward shift of storm tracks under global warming: A Lagrangian perspective, *Geophysical Research Letters*, vol. 44(20), pp. 10666-10674, URL: <https://doi.org/10.1002/2017GL073633>.

Tavakol, A., Rahmani, V., Harrington, J. (2020) Probability of compound climate extremes in a changing climate: A copula-based study of hot, dry, and windy events in the central United States, *Environmental Research Letters*, vol. 15, 104058, doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb1ef>.

---

Tedesco, P., Lenkoski, A., Bloomfield, H.C., Sillmann, J. (2023) Gaussian copula modeling of extreme cold and weak-wind events over Europe conditioned on winter weather regimes, *Environmental Research Letters*, vol. 18, 034008, URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb6aa>.

Terray, L. (2021) A dynamical adjustment perspective on extreme event attribution, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 2, pp. 971-989, doi:<https://doi.org/10.5194/wcd-2-971-2021>.

Tramblay, Y., Thirel, G., Strohmenger, L., Evin, G., Corre, L., Heraut, L., Sauquet, E. (2025) Evolution of flood generating processes under climate change in France, *EGUsphere [preprint]*, URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1635>.

UNEP (2022) *Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires*.

Willems, P., Vrac, M. (2011) Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change, *Journal of Hydrology*, vol. 402, pp. 193-205.

WMO-TD 1500 (2009) *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*, WMO-TD 1500, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72, 55 p.

WMO-№ 1137 (2014) *Commission for Climatology Sixteenth session, Heidelberg, 3-8 July 2014, Abridged final report with resolutions and recommendations*, WMO-№ 1137, 68 p.

WMO (2021) *Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events*, World Meteorological Organization, URL: <https://library.wmo.int>.

Volodin, E.M., Yurova, A.Y. (2013) Summer temperature standard deviation, skewness and strong positive temperature anomalies in the present-day climate and under global warming conditions, *Climate Dynamics*, vol. 40, pp. 1387-1398.

Xuan, Y., Abbas, S.A., Song, X., Reeve, D.E. (2017) Quantile regression-based method for investigating rainfall trends associated with flooding and drought conditions, *European Water*, vol. 59, pp. 137-143.

Yang, C., Li, L., Xu, J. (2017) Changing temperature extremes based on CMIP5 output via semi-parametric quantile regression approach, *International Journal of Climatology*, vol. 38, No 8.

Yu, L. (2019) Global Air–Sea Fluxes of Heat, Fresh Water, and Momentum: Energy Budget Closure and Unanswered Questions, *Annual Review of Marine Science*, vol. 11, doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060704>.

Zappa, G., Shaffrey, L.C., Hodges, K.I., Sansom, P.G., Stephenson, D.B. (2013) A Multimodel Assessment of Future Projections of North Atlantic and European Extratropical Cyclones in the CMIP5 Climate Models, *Journal of Climate*, vol. 26, no. 16, pp. 5846-5862.

---

Zhao, K., Zhao, H., Coupe, J., Klotzbach, P., Wu L. (2024) Simulating the Response of Tropical Cyclones to Potential Nuclear War, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 129(29), doi:<https://doi.org/10.1029/2024JD041658>.

Zheng, Y., Xue, M., Li, B., Chen, J., Tao, Z. (2016) Spatial Characteristics of Extreme Rainfall over China with Hourly through 24-Hour Accumulation Periods Based on National-Level Hourly Rain Gauge Data, *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 33, pp. 1218-1232.

Статья поступила в редакцию (Received): 12.01.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 02.02.2026.

Принята к публикации (Accepted): 17.02.2026.

### **Для цитирования / For citation:**

Золина, О.Г., Володин, Е.М., Стерин, А.М. (2026) Экстремальные климатические события в условиях наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 12, № 1, с. 67-129, doi:10.21513/2410-8758-2026-1-67-129.

Zolina, O.G., Volodin, E.M., Sterin, A.M. (2026) Extreme climate events under observed and projected climate change, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 12, no. 1, pp. 67-129, doi:10.21513/2410-8758-2026-1-67-129.