

# Влияние потепления климата на экстремальную температуру воздуха на территории Республики Тыва на основе данных ERA5

Х. Б. Куулар, А. Ф. Чульдун

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН  
Кызыл, 667007, Россия  
E-mails: k-k-188@list.ru, tajkinol@gmail.com

Представлен анализ долгосрочных изменений экстремальной температуры воздуха на основе метеорологических наблюдений и ERA5-Daily за период 1961–2024 гг. Для количественной оценки экстремумов использованы стандартные индексы, рекомендованные Всемирной метеорологической организацией WMO (*англ.* World Meteorological Organization) и Рабочей группой экспертов по индексам изменения климата ETCCDI (*англ.* Expert Team on Climate Change Detection and Indices): TXx (максимальная дневная температура за год), TNn (минимальная ночная температура за год), а также количество дней с температурой выше 90-го и ниже 10-го перцентилей, рассчитанных относительно базового климатологического периода 1961–1990 гг. Выявление статистически значимых трендов выполнено с применением непараметрического теста Манна–Кендалла при уровне значимости  $p < 0,05$ . Результаты показывают достоверное повышение максимальной дневной температуры и увеличение частоты аномально тёплых дней и ночей, при одновременном сокращении числа экстремально холодных событий. Полученные данные свидетельствуют об усилении температурных экстремумов в регионе и согласуются с общими тенденциями глобального потепления. Работа предоставляет количественную основу для оценки климатических рисков и разработки адаптационных мер в условиях меняющегося климата.

**Ключевые слова:** экстремальная температура воздуха, высотные уровни, данные ERA5

Одобрена к печати: 16.02.2026  
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-359-369

## Введение

В последние десятилетия наблюдается значительный рост частоты и интенсивности экстремальных температурных явлений по всему миру: рекордная жара в Европе (2022), аномальные холода в Северной Америке и устойчивая высокая температура в Азии свидетельствуют о глобальных климатических сдвигах (Climate..., 2023). Согласно последним оценкам, экстремальная температура становится всё более продолжительной и разрушительной, оказывая прямое влияние на здоровье населения, сельское хозяйство и экосистемы.

Анализ глобальной изменчивости экстремальной температуры и осадков в конце XX – начале XXI в. на основе реанализа ERA5 показал усиление температурных экстремумов в большинстве природных зон Земли (Железнова, Гущина, 2023). Столетний метеорологический ряд из Кампинаса (Бразилия) демонстрирует чёткий рост как максимальной, так и минимальной экстремальной температуры с конца XIX в., особенно ускорившийся после 1970-х гг. (Pereira et al., 2023). В регионе Южной Суматры (Индонезия) за период 1981–2020 гг. наблюдается увеличение частоты аномально высокой дневной температуры на фоне изменчивости режима осадков (Ariska et al., 2024). Экстремальный сток в бассейнах Юты (США) тесно связан с изменениями приземной температуры и точки росы, причём эта связь имеет выраженную сезонную зависимость (Wright et al., 2023). Экстремальное потепление на Южных Оркнейских островах (Антарктида) вызывается сочетанием атмосферных и фён-эффектов, что подчёркивает роль синоптических механизмов в усилении температурных аномалий в субантарктическом регионе (Lu et al., 2023).

На территории России также фиксируется учащение аномально тёплых зим и жаркого лета. Например, в 2011 г. в Якутии была зафиксирована температура +38,4 °C — абсолютный

рекорд (Обзор..., 2021). Средняя скорость роста температуры в России в 2,5 раза превышает среднемировой показатель, особенно выражено это в северных и высокогорных регионах. В западной части Российской Арктики за период 1980–2022 гг. отмечено статистически значимое повышение интенсивности и частоты экстремальных температурных событий, особенно в холодный сезон (Серых, Костяной, 2023). Климатические факторы, включая рост средней и экстремальной температуры, оказывают всё более выраженное влияние на состояние наземных экосистем северо-запада России (Васильев и др., 2024). Комплексный подход, сочетающий данные дистанционного зондирования и наземных наблюдений, позволяет эффективно оценивать метеорологическую засуху и её связь с морфометрическими характеристиками агроландшафтов (Павлова, 2024).

В горах Южной Сибири, включая Алтай, Саяны и прилегающие территории, наблюдается не только рост среднегодовой температуры, но и усиление амплитуды экстремальных температурных колебаний.

Цель работы заключается в анализе пространственно-временных особенностей экстремальной температуры воздуха в зависимости от высотных уровней на территории Республики Тыва в условиях современного потепления.

## Данные и методика

В работе использованы ежедневные данные реанализа ERA5 (Copernicus Climate Data Store) за период 1961–2024 гг. с пространственным разрешением  $0,25 \times 0,25^\circ$ . Территория республики была разделена на пять высотных уровней на основе цифровой модели рельефа: 500–1000 м над ур. м., 1001–1300, 1301–1700, 1701–2200, 2201 м над ур. м. и выше. Для анализа высотных особенностей экстремальной температуры воздуха использована схема природного (лесорастительного) районирования гор Южной Сибири (Смагин и др., 1980). Её реализация выполнена на платформе Google Earth Engine.

Исследование базируется на комплексе архивных данных об экстремальной температуре (2000–2024). Для анализа влияния высоты использована цифровая модель рельефа Copernicus DEM GLO-30 (*англ.* Digital Elevation Model Copernicus Global 30m Digital Elevation Model), позволившая выделить пять высотных уровней (от 500 до >2200 м). Вся обработка проведена в Google Earth Engine.

Анализ изменений экстремальных температурных явлений выполнен с использованием стандартных климатических индексов, разработанных и рекомендованных Всемирной метеорологической организацией WMO (*англ.* World Meteorological Organization) совместно с Рабочей группой экспертов по выявлению изменений климата и климатическим индексам ETCCDI (*англ.* Expert Team on Climate Change Detection and Indices). В работе применены следующие климатические индексы экстремальности температурного режима: TXx — годовой максимум дневной максимальной температуры; TNn — годовой минимум ночной минимальной температуры; относительные индексы частоты тёплых и холодных дней и ночей, определяемые как количество дней в году, в которые максимальная (или минимальная) температура превышает 90-й перцентиль (или не достигает 10-го) распределения соответствующего параметра за базовый климатологический период 1961–1990 гг. Перцентильные пороги определялись на основе эмпирического распределения температуры в этот период с использованием метода «оконного» подхода ( $\pm 15$  дней), что обеспечивает сохранение сезонной изменчивости (Williams et al., 2024). Статистическую значимость трендов во временных рядах анализируемых индексов оценивали с помощью непараметрического рангового критерия Манна – Кендалла (Ihimekpen et al., 2018). Динамика температуры оценена через построение линейных регрессий с расчётом коэффициента детерминации  $R^2$  и стандартного отклонения. Статистическая значимость трендов верифицирована тестом Манна – Кендалла при  $p < 0,05$ . Данный подход позволяет объективно оценить направленность и надёжность изменений экстремальных температурных характеристик в условиях нестационарности климатических рядов и отсутствия предположений о нормальности их распределения.

## Результаты и обсуждения

Анализ климатической статистики по экстремальной температуре на территории республики за два периода — 1961–1990 и 1991–2024 гг. — выявляет чёткие признаки климатического потепления, особенно в тёплое время года (*табл. 1*).

*Таблица 1.* Максимальная дневная и минимальная ночная температура в 1961–1990 и 1991–2024 гг. на территории Республики Тыва

| Период    | Показатель | Температура, °С |             |              |
|-----------|------------|-----------------|-------------|--------------|
|           |            | средняя         | минимальная | максимальная |
| 1961–1990 | TXx        | 25,4            | 16,4        | 33,5         |
|           | TNn        | –37,7           | –43,0       | –28,2        |
| 1991–2024 | TXx        | 27,3            | 17,6        | 35,4         |
|           | TNn        | –37,0           | –42,7       | –26,8        |

**Примечание:** TXx — максимальная дневная температура, TNn — минимальная ночная температура.

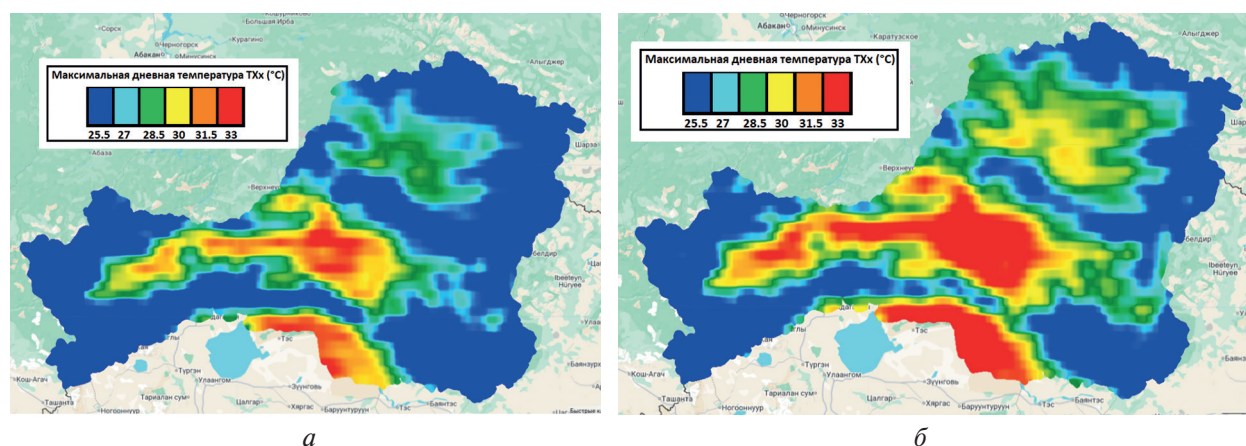
По показателю TXx среднее значение выросло с 25,4 до 27,3 °С, т.е. на 1,9 °С. Это существенное повышение, свидетельствующее об усилении жары в летний период. Даже минимальное значение в ряду самых тёплых дней — т.е. в самый прохладный из «жарких» дней — поднялось с 16,4 до 17,6 °С (+1,2 °С), что означает, что даже относительно умеренные летние дни стали теплее. Абсолютный пик жары также увеличился с 33,5 до 35,4 °С (+1,9 °С), что указывает на рост как частоты, так и интенсивности экстремальных волн жары. В совокупности это говорит о том, что лето в регионе стало теплее, жарче и, вероятно, более продолжительным, а экстремальная жара — более выраженной и опасной. В то же время динамика TNn, характеризующей зимние холода, изменилась значительно слабее. Среднее значение TNn повысилось всего на 0,7 °С — с –37,7 до –37,0 °С. Самая холодная зафиксированная ночь стала лишь немного мягче: с –43,0 до –42,7 °С (+0,3 °С). Однако наиболее заметное изменение наблюдается в «тёплом» конце распределения: температура в самую тёплую из самых холодных ночей поднялась с –28,2 °С до –26,8 °С (+1,4 °С). Это означает, что даже в суровые зимы теперь чаще встречаются менее морозные ночи, а продолжительные периоды экстремальных холодов стали короче. Тем не менее абсолютные рекорды морозов практически не изменились, что типично для регионов с резко континентальным климатом, где при определённых метеорологических условиях (ясное небо, отсутствие ветра) температура может достигать предельно низких значений.

В климатическом контексте рост летней температуры на ~2 °С за чуть более чем 30 лет значительно опережает среднемировой темп потепления (~1,2 °С) и характерен для Сибири, где наблюдается ускоренное потепление, связанное как с арктическим, так и с континентальным усилением климатических изменений. Слабая динамика зимних минимумов объясняется высокой естественной изменчивостью зимней температуры и доминированием радиационного охлаждения в ясные ночи, которое в условиях котловинного рельефа способно генерировать экстремальные морозы независимо от общего потепления. Анализ данных по максимальной дневной температуре в разрезе высотных уровней за два периода — 1961–1990 и 1991–2024 гг. — выявляет чёткую и пространственно дифференцированную картину климатического потепления (*рисунок*, см. с. 362).

Наиболее выраженные изменения наблюдаются в TXx, тогда как TNn также демонстрирует тенденцию к росту, но в меньшей степени и с чёткой зависимостью от высоты над уровнем моря (*табл. 2*).

Во всех высотных диапазонах зафиксирован рост летней жары. На высотном уровне 500–1000 м TXx увеличилась с 30,2 до 32,1 °С, что составляет +1,9 °С. Почти такой же прирост

(+1,9 °С) наблюдается на высотах 1000–1300 м, где температура выросла с 27,7 до 29,6 °С. В более высоких уровнях потепление остаётся значительным, но несколько меньшим: в диапазоне 1300–1700 м — +1,9 °С, на высотах 1700–2200 м — +1,8 °С, а 2200 м и выше — +1,5 °С. Такая закономерность свидетельствует о том, что наиболее интенсивное летнее потепление происходит в низких и средних высотах, где сосредоточены основные населённые пункты, сельскохозяйственные угодья и плотные лесные массивы. Это означает усиление теплового стресса для населения, рост рисков засух и лесных пожаров, а также стресс для растительности и сельхозкультур.



Карты максимальной дневной температуры на территории Республики Тыва: *а* — 1961–1990 гг.; *б* — 1991–2024 гг.

Таблица 2. Анализ изменения максимальной дневной и минимальной ночной температуры по высотным уровням на территории Республики Тыва

| Высотные уровни, м над ур. м.            | 1961–1990 гг. | 1991–2024 гг. | ΔТХх |
|--|---------------|---------------|------|
| <i>Максимальная температура, ТХх, °С</i> |               |               |      |
| 500–1000                                 | 30,2          | 32,1          | +1,9 |
| 1000–1300                                | 27,7          | 29,6          | +1,9 |
| 1300–1700                                | 25,4          | 27,3          | +1,9 |
| 1700–2200                                | 23,1          | 24,8          | +1,8 |
| 2200 и более                             | 20,6          | 22,1          | +1,5 |
| <i>Минимальная температура, ТNн, °С</i>  |               |               |      |
| 500–1000                                 | –36,8         | –35,6         | +1,2 |
| 1000–1300                                | –38,0         | –37,0         | +1,0 |
| 1300–1700                                | –38,1         | –37,3         | +0,7 |
| 1700–2200                                | –37,9         | –37,4         | +0,5 |
| 2200 и более                             | –37,3         | –37,0         | +0,3 |

Примечание: ΔТХх — изменение температуры.

Что касается зимних условий, то и здесь наблюдается потепление, но оно проявляется слабее и имеет ярко выраженный высотный градиент. На высотном уровне 500–1000 м минимальная ночная температура повысилась с –36,8 до –35,6 °С (+1,2 °С), что становится самым значительным изменением среди всех высот. На высотах 1000–1300 м прирост составил +1 °С, на 1300–1700 м — +0,7 °С, на 1700–2200 м — +0,5 °С, а выше 2200 м — всего лишь +0,3 °С. Такая дифференциация объясняется физикой атмосферных процессов: в низинах

зимнее потепление усиливается за счёт общего роста фоновой температуры, антропогенного влияния и способности почвы и растительности удерживать тепло, тогда как в высокогорье доминирует радиационное охлаждение, которое слабо подвержено общим климатическим трендам. В результате самые суровые морозы по-прежнему возможны в горах, особенно в котловинах, но в долинах и предгорьях зимы становятся мягче, с более частыми оттепелями.

На низкогорных и среднегорных высотных уровнях (до 1700 м) усиливается тепловая нагрузка летом, что требует адаптации и противопожарной защиты. Одновременно смягчение зим может снижать риски переохлаждения, но повышает вероятность повреждения растений из-за нестабильного снежного покрова и чередования оттепелей с резкими похолоданиями. В высокогорье, несмотря на меньшие температурные сдвиги, важно учитывать кумулятивное воздействие потепления на мерзлоту, водный баланс и верхнюю границу леса, что может привести к долгосрочной трансформации экосистем.

Анализ представленных данных по двум лесорастительным округам за два периода (1961–1990 и 1991–2024 гг.) выявляет резко контрастные тенденции климатических изменений: в первом округе наблюдается чёткое потепление, особенно в тёплый период года, тогда как во втором округе — сбалансированное потепление, причём зимние минимумы растут быстрее, чем летние максимумы (табл. 3).

Таблица 3. Максимальная дневная и минимальная ночная температура в 1961–1990 и 1991–2024 гг.

| Период  | Показатель | Температура, °С |             |              |
|---|------------|-----------------|-------------|--------------|
|   |            | средняя         | минимальная | максимальная |
| <i>Тоджинский лесорастительный округ</i>          |            |                 |             |              |
| 1961–1990   | TXx        | 25,0            | 19,1        | 29,0         |
|   | TNn        | –38,8           | –41,8       | –34,7        |
| 1991–2024   | TXx        | 27,0            | 21,1        | 30,8         |
|   | TNn        | –38,2           | –40,8       | –34,5        |
| <i>Северо-Таннуольский лесорастительный округ</i> |            |                 |             |              |
| 1961–1990   | TXx        | 25,7            | 21,1        | 31,0         |
|   | TNn        | –36,0           | –39,2       | –32,3        |
| 1991–2024   | TXx        | 27,4            | 22,5        | 33,1         |
|   | TNn        | –34,8           | –38,6       | –30,6        |

Анализ данных по двум лесорастительным округам за периоды 1961–1990 и 1991–2024 гг. выявляет резкий контраст в динамике климатических условий: в первом округе наблюдается чёткое и значимое потепление. В первом округе TXx продемонстрировала существенный рост по всем параметрам: среднее значение повысилось с 25,0 до 27,0 °С (+2,0 °С), минимальное значение (самый прохладный из самых тёплых дней) — с 19,1 до 21,1 °С (+2,0 °С), а максимальное (абсолютный пик жары) — с 29,0 до 30,8 °С (+1,8 °С). Это свидетельствует о том, что лето стало не только в среднем теплее, но и более жарким в экстремальных проявлениях, а даже умеренные тёплые дни теперь значительно теплее, чем несколько десятилетий назад. Зимние условия также претерпели изменения: TNn повысилась с –38,8 до –38,2 °С (+0,6 °С), абсолютный минимум (самая холодная ночь) стал мягче — с –41,8 до –40,8 °С (+1,0 °С), хотя самая тёплая из самых холодных ночей почти не изменилась (–34,7 °С на –34,5 °С). В совокупности это указывает на смягчение самых суровых зим при сохранении общей суровости климата. Такие изменения полностью соответствуют общим тенденциям ускоренного потепления, характерного для республики.

В Северо-Таннуольском округе потепление выражено более сбалансированно — как летом, так и зимой. Средняя TXx выросла с 25,7 до 27,4 °С (+1,7 °С), минимальное значение

в тёплом ряду — с 21,1 до 22,5 °С (+1,4 °С), а максимальный пик — с 31,0 до 33,1 °С (+2,1 °С), что свидетельствует о росте как средней, так и экстремальной летней температуры. Зимой изменения гораздо заметнее: средняя TNn повысилась с –36,0 до –34,8 °С (+1,2 °С), абсолютный минимум стал мягче (был –39,2 °С, стал –38,6 °С), а самая тёплая из самых холодных ночей поднялась с –32,3 до –30,6 °С (+1,7 °С). Это говорит о том, что зимы в этом округе стали ощутимо мягче, сократилась частота сильных морозов и даже в суровые периоды теперь чаще наблюдается менее экстремальная температура. Такой профиль изменений характерен для округов с менее изолированным рельефом, где циркуляционные процессы и общее потепление сильнее влияют на зимний режим — например, для предгорных или равнинных территорий, подверженных влиянию тёплых воздушных масс.

Сравнение двух округов показывает, что Тоджинский округ сохраняет более суровые зимние условия, и потепление в нём выражено преимущественно в летнем периоде, тогда как Северо-Таннуольский округ демонстрирует комплексное потепление — как летом, так и зимой. Это может быть связано с различиями в рельефе, высоте над уровнем моря или положении относительно крупных атмосферных систем. Для Тоджинского округа актуальны риски, связанные с летней жарой и засухой, но при сохранении суровости зим; для Северо-Таннуольского округа — более широкий спектр климатических стрессов: рост температурного диапазона, нестабильность зимнего покрова, возможные сдвиги в вегетационном режиме и экосистемах. Оба округа, однако, подтверждают общий тренд: климат становится теплее, экстремальные события — интенсивнее, а сезонные границы — менее чёткими (табл. 4).

Таблица 4. Анализ изменения максимальной дневной и минимальной ночной температуры по высотным уровням двух лесорастительных округов

| Высотные уровни, м над ур. м. | TXx  | TNn   | TXx                       | TNn   |
|-------------------------------|------|-------|---------------------------|-------|
| Тоджинский округ              |      |       | Северо-Таннуольский округ |       |
| <i>1961–1990 гг.</i>          |      |       |                           |       |
| 500–1000                      | 27,8 | –38,8 | 28,6                      | –34,6 |
| 1000–1300                     | 26,6 | –38,9 | 27,5                      | –35,6 |
| 1300–1700                     | 24,7 | –38,8 | 25,7                      | –36,2 |
| 1700–2200                     | 22,5 | –38,5 | 23,8                      | –35,9 |
| 2200 и более                  | 21,1 | –38,1 | 22,2                      | –35,4 |
| <i>1991–2024 гг.</i>          |      |       |                           |       |
| 500–1000                      | 29,6 | –38,1 | 30,3                      | –33,3 |
| 1000–1300                     | 28,5 | –38,3 | 29,2                      | –34,4 |
| 1300–1700                     | 26,7 | –38,1 | 27,4                      | –35,0 |
| 1700–2200                     | 24,5 | –38,0 | 25,5                      | –35,0 |
| 2200 и более                  | 23,1 | –37,7 | 23,7                      | –34,5 |

В Тоджинском лесорастительном округе потепление проявляется во всех высотных уровнях, но с заметной зависимостью от высоты. Летние максимумы (TXx) выросли на 1,8–1,9 °С в нижних высотных уровнях (500–1000 и 1000–1300 м) и на 1,5–1,7 °С в более высоких зонах (1700–2200 м и выше). Это указывает на то, что тепловой стресс усиливается преимущественно в котловине и предгорьях, где сосредоточены населённые пункты. Зимние минимумы (TNn) также стали мягче, но менее значительно — на +(0,6–0,7) °С в нижних высотных уровнях и на +(0,4–0,5) °С в верхних. При этом абсолютный уровень зимней суровости остаётся очень высоким — даже в 2024 г. средняя TNn на высотном уровне 500–1000 м составляет –38,1 °С, а в зоне 2200 м над ур. м. и более: –37,7 °С. Это говорит о сохранении экстремальных зимних условий, хотя и с некоторым смягчением самых холодных ночей.

В Южно-Таннуольском лесорастительном округе потепление выражено более однородно: летние максимумы (ТХх) выросли на 1,7–1,8 °С почти во всех высотных уровнях — от 500–1000 до 2200+ м. Это свидетельствует о том, что этот округ более чувствителен к общему тренду потепления, возможно, из-за большей экспозиции к тёплым воздушным массам. Зимние минимумы (ТNn) повысились значительно сильнее, чем в Тоджинском лесорастительном округе: на +(1,3–1,5) °С на нижних и на +(0,8–1,0) °С на верхних высотных уровнях. Особенно ярко это проявляется в зоне 500–1000 м, где средняя зимняя температура поднялась с –34,6 до –33,3 °С — это почти 1,3 °С. Такое смягчение зим может увеличить частоту оттепелей, что опасно для лесов.

Сравнение двух округов позволяет сделать несколько важных выводов. Во-первых, климатические изменения не являются одинаковыми: даже в одной республике они могут протекать с разной интенсивностью. Во-вторых, высотный градиент изменений в обоих округах сохраняется, но в первом он выражен сильнее: потепление летом ослабевает с высотой, тогда как во втором — почти одинаково на всех уровнях.

Практически это означает, что в Тоджинском округе основные усилия должны быть направлены на адаптацию к жаркому лету — усиление противопожарной защиты, профилактику тепловых ударов, адаптацию сельхозкультур. В Северо-Таннуольском округе, помимо этого, необходимо учитывать смягчение зим, что требует пересмотра защиты растений. Кроме того, более значительное потепление во втором округе может вызвать более быстрые экологические сдвиги — например, смещение границ леса, активизацию вредителей или изменение водного режима.

Сопоставление двух округов подчёркивает важный вывод: климатические изменения в регионе с резко континентальным климатом носят крайне неоднородный, локальный характер. Даже на относительно небольшой территории один округ может испытывать выраженное потепление — до +2 °С за последние три десятилетия, — тогда как другой остаётся климатически стабильным. Это означает, что усреднённые региональные оценки могут скрывать существенные локальные различия. Например, в Тоджинском округе следует усиливать мониторинг лесопожарной обстановки к более жаркому лету, тогда как во втором округе акцент остаётся на традиционных рисках — суровых, но стабильных зимах и умеренной летней жаре.

Анализ трендов экстремальной температуры за два периода — 1961–1990 и 1991–2024 гг. — выявил существенные различия в динамике температурных экстремумов в зависимости от сезона и по периодам с использованием теста Манна–Кендалла (коэффициент  $\tau$  и  $p$ -значение).

Данные представлены в сглаженном (*англ. smooth*) варианте (сырые (*англ. raw*) варианты незначимы), что позволяет оценить устойчивость трендов. После сглаживания временных рядов (5-летнего скользящего среднего) обнаруживаются достоверные положительные тренды: для лета  $\tau = 0,1302$  ( $p < 0,0001$ ), для зимы — значительно более выраженный —  $\tau = 0,5675$  ( $p < 0,0001$ ). Это свидетельствует о том, что в 1961–1990 гг. долгосрочное потепление уже присутствовало, но маскировалось межгодовой изменчивостью, особенно в летний сезон.

Во втором периоде (1991–2024) картина становится более чёткой и указывает на ускорение климатических изменений. Для зимы сглаженные данные демонстрируют чрезвычайно сильный положительный тренд ( $\tau = 0,7687$ ,  $p = 0,0056$ ), что может интерпретироваться как устойчивое смягчение минимальной ночной температуры и сокращение числа экстремально холодных событий. Интересно, что сырые зимние данные почти не показывают тренда ( $\tau = 0,0044$ ,  $p = 0,0541$ ), что подчёркивает важность фильтрации шума при анализе коротких временных рядов с высокой дисперсией. Летние данные во втором периоде также дают значимый тренд только в сглаженной версии ( $\tau = 0,0377$ ,  $p < 0,0001$ ), несмотря на крайне слабый коэффициент, что может отражать рост частоты аномальных жарких дней на фоне общей неустойчивости метеорологических условий (например, из-за усиливающейся циркуляционной изменчивости).

За период 1961–2024 гг. в республике наблюдается нелинейная, но устойчивая трансформация температурного режима. Летняя дневная температура демонстрирует наиболее выраженный тренд (+0,39 °С/10 лет,  $R^2 = 0,76$ ), что указывает на переход к более жаркому лету.

Зимний климат характеризуется ростом экстремальных тёплых событий ( $+0,35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ,  $R^2 = 0,855$ ) на фоне замедления типичного ночного потепления ( $+0,26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ,  $R^2 = 0,575$ ). Эти изменения отражают глобальный сдвиг от аэрозоль-доминированного воздействия к парниковому климатическому и требуют адаптационных мер в сельском хозяйстве, экологии и инфраструктуре региона.

Наблюдается достоверное усиление температурных экстремумов — в первую очередь за счёт роста тёплых минимумов зимой и увеличения числа аномально жарких событий летом, — что соответствует глобальному потеплению климата, особенно выраженному в континентальных и высокогорных регионах Сибири. Таким образом, представленные данные демонстрируют, что в условиях сложного рельефа и континентального климата локальная климатология становится ключевым фактором устойчивого развития.

## Заключение

Представленные данные по динамике экстремальной температуры Республики Тыва за период 1961–2024 гг. свидетельствуют о чётком и устойчивом тренде климатического потепления, который проявляется в первую очередь в усилении летней жары, а во вторую — в смягчении зимних морозов, особенно в низких и средних высотных уровнях. Анализ показал, что средняя максимальная дневная температура (ТХх) повысилась в различных высотных уровнях на  $1,5\text{--}1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , причём наиболее интенсивные изменения зафиксированы в пределах 500–1300 м над ур. м., где сосредоточены основные населённые пункты, сельскохозяйственные угодья и значительная часть лесных экосистем. Одновременно минимальная ночная температура (ТНн) также показывает рост, однако в значительно меньшей степени: от  $+0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  на высотах свыше 2200 м до  $+1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  в котловинах. Такая асимметрия подчёркивает ключевую особенность современного климатического изменения в регионах с резко континентальным климатом: лето реагирует на глобальное потепление быстрее и сильнее, чем зима, особенно в условиях сложного горно-котловинного рельефа и выраженного радиационного охлаждения.

Важно отметить, что даже незначительное потепление на верхних высотных уровнях может иметь масштабные последствия. Хотя абсолютные рекорды холода сохраняются, сокращение продолжительности экстремально морозных периодов и повышение средней зимней температуры создают условия для лучшей зимовки насекомых-вредителей, таких как сибирский шелкопряд или короеды, что уже приводит к массовому ослаблению и гибели лесов. В то же время рост летней температуры усиливает испарение, снижает влажность почвы и растительной подстилки, способствуя более частым и интенсивным пожарам растительности — явлению, которое за последние два десятилетия стало регулярным и разрушительным фактором для экосистем и здоровья населения.

Сравнение данных двух лесорастительных округов показало, что степень проявления климатических изменений зависит от локальных условий. В Тоджинском округе с более сухим, изолированным климатом потепление выражено преимущественно в тёплый период года. В Северо-Таннуольском округе — в горном рельефе — наблюдается комплексное потепление: и летом, и зимой. Это подтверждает необходимость высотно-дифференцированного подхода к оценке климатических рисков и разработке мер адаптации.

Для лесных экосистем республики эти изменения означают постепенный переход к новому климатическому равновесию, сопровождающемуся стрессом, сменой видового состава и, в отдельных случаях, деградацией растительного покрова. Особенно уязвимы кедрово-лиственничные леса, которые на южных границах своего ареала всё чаще уступают место более засухоустойчивым, но менее биоразнообразным сообществам. При этом процессы лесовозобновления замедляются из-за нарушения естественных условий стратификации семян, водного дефицита и частых пожаров.

Таким образом, климат в республике находится в состоянии активной трансформации. Наблюдаемые изменения не являются локальным феноменом — они вписываются в процесс

глобального потепления. Однако именно локальная специфика — рельеф, высотная поясность, типы экосистем и социально-экономическая структура — определяет, как именно эти глобальные тренды проявляются на местах. Это требует не только мониторинга климатических параметров, но и разработки адаптивных стратегий, ориентированных на конкретные высотные зоны и типы ландшафтов. Только такой подход позволит обеспечить устойчивость лесных экосистем, сохранить биоразнообразие и защитить здоровье и благополучие населения в условиях неизбежного продолжения климатических изменений в XXI в.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания ФГБУН Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

## Литература

1. *Васильев М. П., Нестеров Е. М., Каширина Е. В. и др.* Оценка влияния климатических факторов на состояние наземных экосистем северо-западного региона России // Изв. Российской акад. наук. Сер. геогр. 2024. Т. 88. № 2. С. 145–157. DOI: 10.31857/S2587556624020045.
2. *Железнова И. В., Гущина Д. Ю.* Изменчивость экстремальных температур воздуха и осадков в конце XX и в начале XXI веков в различных природных зонах Земли по данным реанализа ERA5 // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 5. С. 549–559. DOI: 10.31857/S0002351523050139.
3. *Павлова А. И.* Оценка метеорологической засухи и морфометрический анализ рельефа агроландшафтов с применением данных дистанционного зондирования и наземных метеорологических наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 220–230. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-220-230.
4. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год / Росгидромет. М., 2021. 205 с.
5. *Серых И. В., Костяной А. Г.* Изменения параметров экстремальных температурных событий западной части Российской Арктики по данным реанализов ERA5 и MERRA-2 в 1980–2022 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 4. С. 464–485. DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-464-485.
6. *Смагин В. Н., Ильинская С. А., Назимова Д. И., Новосельцева И. Ф., Чередникова Ю. С.* Типы лесов гор Южной Сибири / под ред. В. Н. Смагина. Новосибирск: Наука. Сибирское отд-ние, 1980. 334 с.
7. *Ariska M., Supari S., Irfan M., Iskandar I.* Profile of rainfall patterns and extreme air temperatures 1981–2020 in the Muson region of Indonesia (case study: South Sumatra) // Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lampung Mangkurat. 2024. V. 21. No. 1. P. 81–89. DOI: 10.20527/flux.v21i1.14022.
8. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. Core Writing Team, H. Lee, J. Romero. Geneva: IPCC, 2023. 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
9. *Ihimekpen N. I., Ilaboya I. R., Awah L. O.* Non-parametric Mann-Kendall test statistics for rainfall trend analysis in some selected states within the coastal region of Nigeria // J. Civil, Construction and Environmental Engineering. 2018. V. 3. No. 1. P. 17–28. DOI: 10.11648/j.jceee.20180301.14.
10. *Lu H., Orr A., King J. et al.* Extreme warm events in the South Orkney Islands, Southern Ocean: Compounding influence of atmospheric rivers and föhn conditions // Quarterly J. Royal Meteorological Soc. 2023. V. 149. No. 757. P. 3645–3668. DOI: 10.1002/qj.4578.
11. *Pereira L. B., Martins L. L., Rodrigues I. C. A. et al.* Changes in extreme air temperatures in one of South America's longest meteorological records: Campinas, Brazil (1890–2022) // Bragantia. 2023. V. 82. Article e23230029. DOI: 10.1590/1678-4499.20230128.
12. *Williams E., Funk C., Peterson P., Tuholske C.* High-resolution climate change observations and projections for the evaluation of heat-related extremes // Scientific Data. 2024. V. 11. No. 1. Article 261. DOI: 10.1038/s41597-024-03074-w.
13. *Wright T. E., Stuienvolt-Allen J. A., Affram G. et al.* Responses of extreme discharge to changes in surface-air and dewpoint temperatures in Utah: seasonality and mechanisms // Water. 2023. V. 15. No. 4. Article 688. DOI: 10.3390/w15040688.

## The impact of climate warming on air temperature extremes in Republic of Tyva based on ERA5 data

Kh. B. Kuular, A. F. Chuldum

*Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl 667007, Russia*  
E-mails: k-k-188@list.ru, tajkinol@gmail.com

The study presents an analysis of long-term changes in temperature extremes based on ERA5 daily dataset over the period of 1961–2024. To quantify extreme events, we applied standardized climate indices recommended by the World Meteorological Organization (WMO) and the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI): TXx (annual maximum of daily maximum temperature), TNn (annual minimum of daily minimum temperature), as well as the number of days with temperatures exceeding the 90th percentile (hot days/nights) or falling below the 10th percentile (cold days/nights) calculated relative to the baseline reference period of 1961–1990. Statistically significant trends were identified using the non-parametric Mann–Kendall test at a significance level of  $p < 0.05$ . The results reveal a significant increase in maximum daily temperatures and a rising frequency of anomalously warm days and nights, accompanied by a marked decline in the occurrence of extremely cold events. These findings indicate an intensification of temperature extremes in the region, consistent with broader patterns of global warming. The study provides a quantitative basis for climate risk assessment and development of adaptation strategies under conditions of changing climate.

**Keywords:** extreme air temperatures, elevation zones, ERA5 data

Accepted: 16.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-359-369

### References

1. Vasiliev M. P., Nesterov E. M., Kashirina E. V. et al., Assessment of the influence of climatic factors on the state of terrestrial ecosystems in the Northwestern Region of Russia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2024, V. 88, No. 2, pp. 145–157 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556624020045.
2. Zheleznova I. V., Gushchina D. Yu., Variability of extreme air temperatures and precipitation in different natural zones in late XX and early XXI centuries according to ERA5 reanalysis data, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2023, V. 59, No. 5, pp. 549–559 (in Russian), DOI: 10.31857/S0002351523050139.
3. Pavlova A. I., Assessment of meteorological drought and morphometric analysis of the relief of agro-landscapes using remote sensing data and meteorological observation data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 220–230 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-220-230.
4. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy v Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* (Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2020), Moscow, 2021, 205 p. (in Russian).
5. Serykh I. V., Kostyanoy A. G., Changes in parameters of extreme temperature events in the western part of the Russian Arctic according to ERA5 and MERRA-2 reanalyses in 1980–2022, *Arctic and Antarctic Research*, 2023, V. 69, No. 4, pp. 464–485 (in Russian), DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-464-485.
6. Smagin V. N., Il'inskaya S. A., Nazimova D. I., Novosel'tseva I. F., Cherednikova Yu. S., *Tipy lesov gor Yuzhnoi Sibiri* (Types of forests in the mountains of Southern Siberia), V. N. Smagin (ed.), Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otделение, 1980, 334 p. (in Russian).
7. Ariska M., Supari S., Irfan M., Iskandar I., Profile of rainfall patterns and extreme air temperatures 1981–2020 in the Muson region of Indonesia (case study: South Sumatra), *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 81–89, DOI: 10.20527/flux.v21i1.14022.
8. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Core Writing Team, H. Lee, J. Romero (eds.), Geneva: IPCC, 2023, 184 p., DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
9. Ihimekpen N. I., Ilaboya I. R., Awah L. O., Non-parametric Mann-Kendall test statistics for rainfall trend analysis in some selected states within the coastal region of Nigeria, *J. Civil, Construction and Environmental Engineering*, 2018, V. 3, No. 1, pp. 17–28, DOI: 10.11648/j.jccee.20180301.14.

10. Lu H., Orr A., King J. et al., Extreme warm events in the South Orkney Islands, Southern Ocean: Compounding influence of atmospheric rivers and föhn conditions, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2023, V. 149, No. 757, pp. 3645–3668, DOI: 10.1002/qj.4578.
11. Pereira L. B., Martins L. L., Rodrigues I. C. A. et al., Changes in extreme air temperatures in one of South America's longest meteorological records: Campinas, Brazil (1890–2022), *Bragantia*, 2023, V. 82, Article e23230029, DOI: 10.1590/1678-4499.20230128.
12. Williams E., Funk C., Peterson P., Tuholske C., High resolution climate change observations and projections for the evaluation of heat-related extremes, *Scientific Data*, 2024, V. 11, No. 1, Article 261, DOI: 10.1038/s41597-024-03074-w.
13. Wright T. E., Stuijvenolt-Allen J. A., Affram G. et al., Responses of extreme discharge to changes in surface-air and dewpoint temperatures in Utah: seasonality and mechanisms, *Water*, 2023, V. 15, No. 4, Article 688, DOI: 10.3390/w15040688.