

УДК 551.524

## ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПО ДАННЫМ МЕТЕОСТАНЦИИ ЦУГШПИТЦЕ

© 2025 г. С. А. Рябова\*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия**\*E-mail: riabovasa@mail.ru*

В ходе настоящей работы выполняется анализ временной динамики среднемесячных и среднегодовых значений температуры воздуха по данным инструментальных наблюдений за вариациями температуры на высокогорной метеостанции Цугшпитце с августа 1900 по июль 2025 гг. С целью выделения трендовой составляющей и нахождения точки изменения вариаций температуры использовались несколько методов: тест Манна–Кендалла, оценочная функция Тейла–Сена, метод сингулярного спектрального анализа, алгоритм CUSUM и метод сегментированного регрессионного анализа. Установлено, что в изменениях температуры воздуха наблюдается тенденция к росту температуры со временем. Выделение трендовой составляющей методом сингулярного спектрального анализа продемонстрировало увеличение темпа роста температуры примерно с 1969 г., что подтверждают результаты, полученные с применением метода сегментированного регрессионного анализа и алгоритма CUSUM. Двухсегментная регрессия хорошо аппроксимирует вариации температуры за период с 1901 по 2024 гг. (коэффициент детерминации составляет 0.61).

**Ключевые слова:** температура воздуха, сингулярный спектральный анализ, тест Манна–Кендалла, оценочная функция Тейла–Сена, сегментированная регрессия, алгоритм CUSUM.

**Для цитирования:** Рябова С.А. Особенности временных вариаций среднемесячных значений температуры воздуха по данным метеостанции Цугшпитце // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 107–114. [https://doi.org/10.26006/29490995\\_2025\\_17\\_4\\_107](https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_107)

### Введение

Изменение климата – глобальная проблема, оказывающая системное влияние на социально-экономическое развитие и условия жизни людей [Lukyanets, Ryazantsev, 2016]. Согласно шестому оценочному докладу рабочей группы МГЭИК «Физическая научная основа» антропогенное влияние, несомненно, способствовало глобальному потеплению климатической системы с доиндустриальных времен [Climate..., 2021]. Основными последствиями являются рост среднегодовой температуры и таяние ледников, что приводит к подъему уровня мирового океана, а также сильной засухе и пожарам, наводнениям и цунами, сокращению биоразнообразия [Логинов, Микуцкий, 2017]. Эти изменения оказывают негативное воздействие на качество жизни людей, включая доступность продовольствия, здоровье, пригодность территорий для жилья и ведения экономической деятельности и многое другое [Изменение..., 2008; Romanello et al., 2021].

Глобальное потепление температуры поверхности Земли наблюдается на всем земном шаре, однако пространственно оно не однородно [Груза и др., 2015]. В рамках исследования проблемы изменения климата актуально выполнение анализа вариаций температуры воздуха в разных точках нашей планеты [Кислов, 2001], в том числе, важно проведение такого рода исследований для горных регионов. Климат горных районов уникален и сильно отличается от климата прилегающих равнин. Для гор характерны пониженные температуры и атмосферное давление, повышенная интенсивность солнечной радиации, образование специфических ветров и абсолютная влажность воздуха [Барри,

1984]. Несмотря на их важность в формировании климата, до настоящего времени горным системам уделялось мало внимания в международных соглашениях, например, в Парижском соглашении по изменению климата [Парижское..., 2015] не упоминаются горы и криосфера.

Период с 2023 по 2027 гг. провозглашен Генеральной Ассамблеей ООН «Пятилетием действий по развитию горных регионов» [Резолюция..., 2022], в связи с этим представляется актуальным исследование климатических особенностей высокогорных регионов, в том числе проведение анализа динамики температуры воздуха. К высокогорным районам относится гора Цугшпитце, где выполняется регистрация температуры воздуха с 1900 г. до настоящего момента.

В ходе настоящей работы выполняется анализ временных вариаций среднемесячных и среднегодовых значений температуры воздуха по данным инструментальных наблюдений за вариациями температуры на высокогорной метеостанции Цугшпитце.

### Исходные данные и методы

В рамках выполнения настоящих исследований рассматривались вариации среднемесячных значений температуры воздуха за период с августа 1900 по июль 2025 гг. Следует отметить, что в данных имеется единственный разрыв, с мая по август 1945 г. Метеостанция Цугшпитце расположена на горе на высоте 2574 м; географические координаты: 47°25'00" с.ш., 10°58'59" в.д.

Гора Цугшпитце – самая высокая точка Германии (высота составляет 2962 м), входит в состав хребта Веттерштайн, который является частью Северных Известняковых Альп. Цугшпитце находится в 11 км от немецкого города Гармиш–Партенкирхен и в 6 км от австрийского поселка Эрвальд. Несмотря на то, что гора Цугшпитце располагается на территории умеренного пояса, для ее вершины характерен тундровый климат с большим количеством осадков и довольно высокими температурами. Подробная характеристика местоположения метеостанции представлена в [Рябова, 2024].

В настоящей работе с целью выделения трендовой составляющей и нахождения точки изменения скорости вариаций температуры использовались: тест Манна–Кендалла, оценочная функция Тейла–Сена, метод сингулярного спектрального анализа и метод сегментированного регрессионного анализа.

Тест Манна–Кендалла [Mann, 1945; Кендэл, 1975] представляет собой непараметрический тест, который определяет наличие или отсутствие тренда на рангах данных. Он не зависит от конкретных значений метрики, а лишь учитывает их порядок, то есть знак разности между последовательными наблюдениями. Среди преимуществ этого теста можно отметить его независимость от выбросов и способность выявлять монотонные зависимости даже в случае нелинейной формы зависимости [Greene, 2003]. Используемая в тесте Манна–Кендалла Z-статистика показывает значимость тренда [Subash et al., 2011]. При уровне значимости 5% нулевая гипотеза об отсутствии тренда отклоняется, если  $p\text{-value} \leq 0.05$ , а  $Z > 1.96$  или  $Z < -1.96$  [Greene, 2003].

С целью выделения линейного тренда использовалась оценочная функция Тейла–Сена, представляющая собой метод для робастного линейного сглаживания множества точек (простая линейная регрессия), в котором выбирается медиана наклонов всех прямых, проходящих через пары точек выборки на плоскости [Sen, 1968; Fernandes, Leblanc, 2005].

Кроме того, в ходе настоящих исследований выполнялось выделение нелинейного тренда на основе применения метода сингулярного спектрального анализа, который заключается в декомпозиции временного ряда на его составляющие, называемые эмпирическими компонентами [Elsner, Tsonis, 1996; Vautard et al., 1992]. Каждая эмпирическая компонента содержит информацию о ряде определенной частоты и длины внутри оконной последовательности [Поршнев, Рабая, 2016; Golyandina, 2001]. Этот метод хорошо зарекомендовал себя, в частности, при анализе тренда вариаций компонент магнитного поля Земли [Адушкин и др., 2021; Рябова, 2019]. В настоящей работе для выделения тренда группировались собственные тройки с медленно меняющимися сингулярными векторами [Alexandrov, 2008].

Для обнаружения точек изменений вариаций температуры воздуха на метеостанции Цугшпитце использовался классический и широко используемый алгоритм CUSUM (*Cumulative Sum Control*

Chart). Впервые предложенный Э. С. Пейджем в 1954 г. [Page, 1954] CUSUM опирается на принципы последовательного анализа и тесно связан с тестом последовательного отношения правдоподобия Вальда [Greene, 2003].

Для оценки момента изменения наклона вариаций температуры воздуха применялся метод сегментированного регрессионного анализа, апробированный при выделении геомагнитных джерков (определение наклона первой производной вековой вариации и его изменений) [Рябова, Шалимов, 2022; 2023]. При анализе временных вариаций температуры на метеостанции Цугшпитце местоположение точки останова неизвестно [Chen et al., 2011]. С целью поиска наилучшего местоположения точки останова была использована процедура глобальной оптимизации. При решении задачи оптимизации использовался алгоритм дифференциальной эволюции (наиболее успешный стохастический метод глобальной оптимизации функций вещественных переменных) [Storn, Price, 1997]. Достоинством этого метода является сравнительная простота реализации, недостатком – необходимость в многократном обращении к целевой функции, что приводит к увеличению времени расчетов [Ahmad et al., 2022]. Подробный алгоритм дифференциальной эволюции, используемый в настоящей работе, представлен в работах [Рябова, Шалимов, 2023; Price et al., 2005].

### Результаты и их обсуждение

На основе данных многолетних наблюдений на высокогорной метеостанции Цугшпитце тренды среднемесячных, среднесезонных и среднегодовых температур воздуха были определены с помощью непараметрического теста Манна–Кендалла и теста наклонов Сена (оценочная функция Тейла–Сена).

Результаты теста Манна–Кендалла для тренда температуры воздуха каждого месяца (с августа 1900 по июль 2025 гг.), сезонного (с декабря 1900 по февраль 2025 гг.) и годового трендов (с 1901 по 2024 гг.) представлены в табл. 1.

Таблица 1.

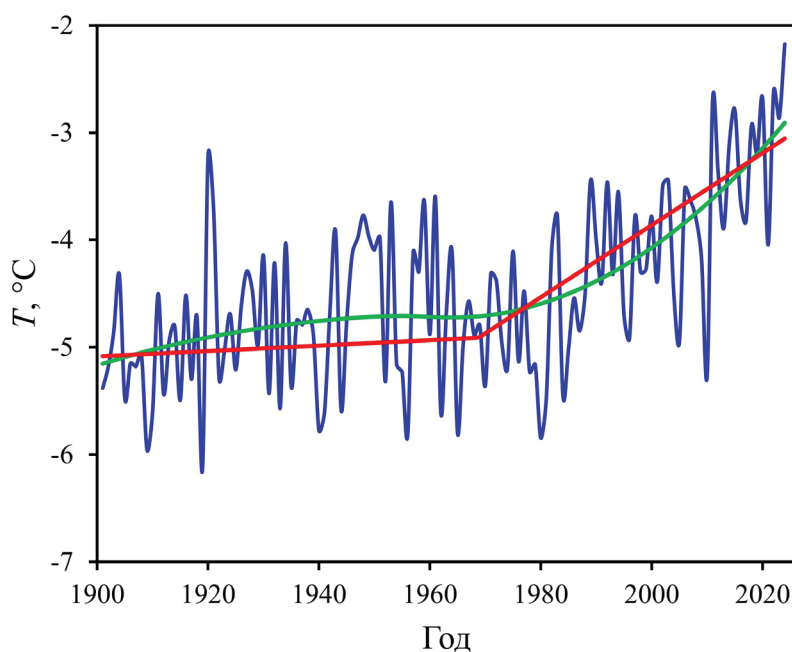
Результаты теста Манна–Кендалла (значения *Z*-статистики и *p-value*) и теста наклонов Сена для месячных, сезонных и годовых значений температуры воздуха по данным метеостанции Цугшпитце

Временной масштаб	<i>Z</i> -статистика	<i>p-value</i>	Наклон Сена
Январь	1.67	0.09	0.009
Февраль	2.19	0.03	0.015
Март	1.82	0.07	0.010
Апрель	1.97	0.04	0.009
Май	1.35	0.18	0.005
Июнь	4.20	$3 \cdot 10^{-5}$	0.017
Июль	2.19	$3 \cdot 10^{-6}$	0.018
Август	5.53	$3 \cdot 10^{-8}$	0.022
Сентябрь	1.77	0.08	0.008
Октябрь	3.86	$1 \cdot 10^{-4}$	0.018
Ноябрь	2.00	0.04	0.010
Декабрь	1.23	0.22	0.007
Зима	2.12	0.03	0.009
Весна	3.05	$2 \cdot 10^{-3}$	0.009
Лето	6.51	$7 \cdot 10^{-11}$	0.019
Осень	3.87	$1 \cdot 10^{-4}$	0.012
Год	6.28	$3 \cdot 10^{-10}$	0.013

В результате анализа значений  $Z$ -статистики и  $p$ -value, представленных в табл. 1, получено, что для сезонных и годовых значений температуры опровергается нулевая гипотеза об отсутствии тренда (при уровне значимости 0.05). Анализ среднемесячных температур показал, что за период с августа 1900 по июль 2025 гг. минимальная среднемесячная температура наблюдалась в феврале 1956 г. и составила  $-19.05^{\circ}\text{C}$ , максимальная среднемесячная температура наблюдалась в августе 2024 г. –  $7.56^{\circ}\text{C}$ .

Как видно из табл. 1, величина наклона Сена для всех месячных, сезонных и годовых значений температуры указывает на наличие значимого тренда к повышению в исследуемом районе. Следует отметить, что наибольшая величина роста температуры приходится на летние месяцы и октябрь. Анализ величин наклона Сена для разных сезонов, представленных в табл. 1, подтверждает доминирующую роль летних месяцев в потеплении климата на горе Цугшпитце. Такое поведение может быть связано с наибольшим отступанием снежников и максимальным прогревом поверхности в этот временной период. Величина среднегодовой температуры показывает тенденцию к повышению на  $0.013^{\circ}\text{C}$  в год. Отмечается увеличение значений среднегодовой температуры, что свидетельствует о потеплении климата за период с 1901 по 2024 гг.

Исходя из предположения, что рост температуры не всегда имеет одинаковую величину, в настоящей работе более детально изучена динамика среднегодовых значений температуры воздуха по данным метеостанции Цугшпитце. На рис. 1 приведены вариации среднегодовых значений температуры воздуха за период 1901 по 2024 гг. Максимальная среднегодовая температура наблюдалась в 2024 г.  $-2.71^{\circ}\text{C}$ . Минимальная среднегодовая температура наблюдалась в 1919 г. и составила  $-6.13^{\circ}\text{C}$ . Визуальный анализ данных рис. 1 показал, что темп роста температуры значительно увеличился с 1969 г. Это хорошо отображает динамика трендовой составляющей, рассчитанной с помощью метода сингулярного спектрального анализа.



**Рис. 1.** Вариации среднегодовых значений температуры воздуха по данным метеостанции Цугшпитце за период с 1901 по 2024 гг. Зеленая линия – вариации трендовой составляющей, рассчитанной с помощью метода сингулярного спектрального анализа, красная – результаты линейной регрессии

Результаты теста Манна–Кендалла для среднегодовых вариаций за периоды с 1901 по 1968 гг., 1969 по 2024 гг. и 1901 по 1969 гг. представлены в табл. 2. Анализ значений  $Z$ -статистики и  $p$ -value (табл. 2) показал, что для всех рассматриваемых периодов опровергается нулевая гипотеза об отсутствии тренда.

Таблица 2.

Результаты теста Манна–Кендалла (значения  $Z$ -статистики и  $p$ -value) и теста наклонов Сена для среднегодовых значений температуры воздуха за период с 1901 по 1968 гг., 1969 по 2024 гг. и 1901 по 2024 гг. по данным метеостанции Цугшпитце

Временной масштаб	$Z$ -статистика	$p$ -value	Наклон Сена
1901–1968 гг.	2.14	0.03	0.010
1969–2024 гг.	5.55	$3 \cdot 10^{-8}$	0.038
1901–2024 гг.	6.28	$3 \cdot 10^{-10}$	0.013

Результаты теста наклона Сена (табл. 2) демонстрируют, что за 124-летний период исследования на метеостанции Цугшпитце наблюдается увеличение среднегодовой температуры с темпом  $0.013^\circ \text{C}$  в год. В период с 1901 по 1968 гг. наблюдается увеличение среднегодовой температуры приблизительно с таким же темпом ( $0.01^\circ \text{C}$  в год). Значительное увеличение темпа ( $0.038^\circ \text{C}$  в год) отмечается с 1969 по 2024 гг., что практически в 4 раза выше темпа для периода с 1901 по 1968 гг. и в 3 раза выше темпа для периода с 1901 по 2024 гг.

Алгоритм CUSUM использовался для анализа точек изменения среднегодовой температуры в период с 1901 по 2024 гг. Анализ результатов алгоритма CUSUM, представленных на рис. 2, показал, что для условий горы Цугшпитце отмечается одна точка резкого изменения температуры воздуха – в период с 1968–1970 гг.

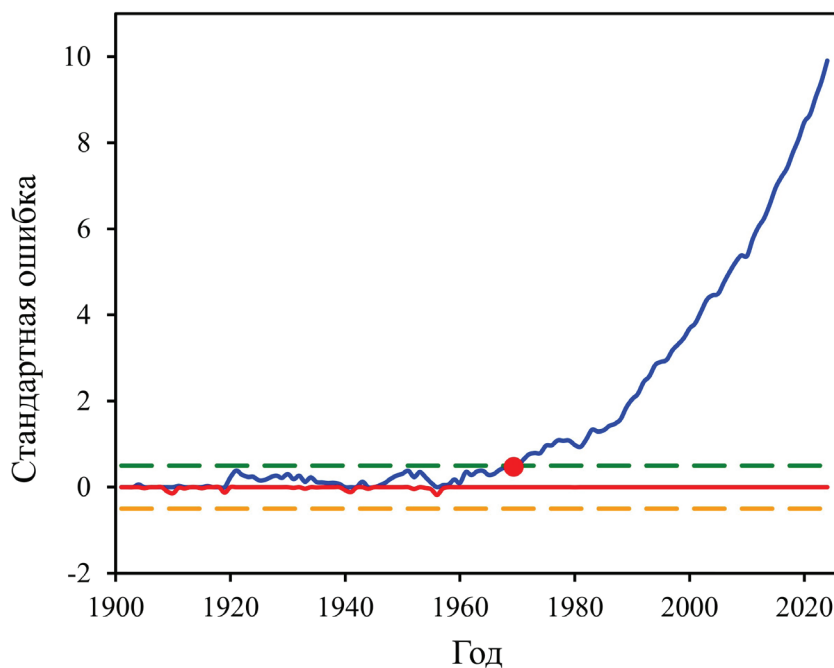


Рис. 2. Результаты алгоритма CUSUM для вариаций среднегодовой температуры в период с 1901 по 2024 гг. Синяя линия – верхняя кумулятивная сумма, красная – нижняя кумулятивная сумма, зеленая и оранжевая линии – контрольный предел; красная точка – выделенная алгоритмом CUSUM точка изменения

В дополнение был применен метод сегментированного регрессионного анализа, ранее апробированный при выделении геомагнитных джерков (определение наклона первой производной вековой вариации и его изменений). Из данных рис. 1 видно, что в ходе сегментированного регрессионного анализа с одной точкой останова, местоположение которой неизвестно, выделено изменение в наклоне вариаций температуры воздуха на метеостанции Цугшпитце примерно в 1969 г.

Результаты метода сегментированного регрессионного анализа, представленные на рис. 1, демонстрируют, что на метеостанции Цугшпитце в период с 1901 по 1968 гг. наблюдается увеличение среднегодовой температуры с темпом  $0.003^\circ \text{C}$  в год, в период с 1969 по 2024 гг. наблюдается



значительное увеличение (в 10 раз больше) темпа изменения среднегодовой температуры ( $0.034^{\circ}\text{C}$  в год). Двухсегментная регрессия аппроксимирует вариации температуры за период с 1901 по 2024 гг. с коэффициентом детерминации 0.61.

### Заключение

В настоящем исследовании проанализированы тренды, точки резкого изменения наклона изменения температуры в годовом и месячном масштабах. С целью выделения трендовой составляющей и нахождения точки изменения вариаций температуры использовались: тест Манна–Кендалла, оценочная функция Тейла–Сена, метод сингулярного спектрального анализа, тест CUSUM и метод сегментированного регрессионного анализа. По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы. В целом в период с 1901 по 2024 гг. для условий горы Цугшпитце наблюдается повышение температуры воздуха с интенсификацией этих изменений в период с 1969 по 2024 гг. Можно предположить, что этот процесс в какой-то степени связан с возрастающим антропогенным воздействием на окружающую среду и является проявлением глобального изменения климата. Двухсегментная регрессия с точкой останова примерно в 1969 г. хорошо аппроксимирует вариации температуры за период с 1901 по 2024 гг. (коэффициент детерминации составляет 0.61). Представленные в работе результаты будут полезны для понимания временной динамики температуры воздуха в высокогорных (в настоящее время все еще слабо изученных) регионах и дополняют обширные исследования, проведенные в области метеорологии и атмосферных наук.

### Финансирование

*Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012700798-8).*

### Список литературы

- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М. : ГЕОС. 2021. – 264 с.
- Барри Р.Г. Погода и климат в горах. Л. : Гидрометеиздат. 1984. – 313 с.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Смирнов В.Д. Географические и сезонные особенности современного глобального потепления // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 2. С. 41–62. <https://www.elibrary.ru/vehukh>
- Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 8: Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля / Под ред. Г. А. Жеребцова. М. : ИСЗФ СО РАН, ИФЗ РАН. 2008. – 280 с.
- Кендэл М. Ранговые корреляции. М. : Статистика. 1975. – 216 с.
- Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. МГУ. МАИК «Наука». М. : Интерпериодика. 2001. – 352 с.
- Логинов В.Ф., Микуцкий В.С. Изменения климата: тренды, циклы, паузы. Минск : Беларуская навука. 2017. – 179 с.
- Парижское соглашение по изменению климата, 2015. [https://unfccc.int/sites/default/files/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf)
- Поршнев С.В., Рабайя Ф. Исследование особенностей применения метода сингулярного спектрального анализа в задаче анализа и прогнозирования временных рядов: монография. Ульяновск : Зебра. 2016. – 167 с.
- Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 14 декабря 2022 года [по докладу Второго комитета (A/77/443/Add.11, пункт 7)] 77/172. Устойчивое горное развитие. <https://docs.un.org/ru/A/RES/77/172>
- Рябова С.А. Исследование мультифрактальности температуры по данным метеостанции Цугшпитце // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 1. С. 26–32. <http://dx.doi.org/10.31857/S0002351524010038>
- Рябова С.А. Особенности вековой вариации геомагнитного поля на среднеширотных обсерваториях «Михнево» и «Бельск» // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 1. С. 125–136. <http://dx.doi.org/10.1134/S0016794018060147>

- Рябова С.А., Шалимов С.Л. О короткопериодной динамике в ядре Земли по наземным наблюдениям геомагнитных джерков // Физика Земли. 2023. № 1. С. 3–11. <https://dx.doi.org/10.31857/S0002333723010040>
- Рябова С.А., Шалимов С.Л. О повторяемости геомагнитных джерков по наблюдениям на среднеширотных обсерваториях // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 214–218. <https://dx.doi.org/10.31857/S2686739722600813>
- Ahmad M.F., Isa N.A.M., Lim W.H., Ang K.M. Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works // Alexandria Engineering Journal. 2022. Vol. 61 (5). P. 3831–3872. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.013>
- Alexandrov T. A method of trend extraction using singular spectrum analysis // Revstat. 2008. Vol. 7 (1). P. 1–22.
- Chen C.W.S., Chan J.S.K., Gerlach R., Hsieh W.Y.L. A comparison of estimators for regression models with change points // Statistics and Computing. 2011. Vol. 21. P. 395–414. <https://dx.doi.org/10.1007/s11222-010-9177-0>
- Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. V. Masson-Delmotte, 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, B. Zhou.: Cambridge University Press. Cambridge. New York. 2021.– 2391 p.
- Elsner J., Tsonis A. Singular spectrum analysis. A new tool in time series analysis. Plenum Press, New York. 1996. – 163 p.
- Fernandes R., Leblanc S.G. Parametric (modified least squares) and non-parametric (Theil–Sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 95 (3). P. 303–316. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.01.005>
- Golyandina N.E., Nekrutkin V.V., Zhigljavsky A.A. Analysis of time series structure: SSA and related techniques. Chapmap & Hall/CRC. Boca Raton. 2001. – 305 p.
- Greene W.H. Econometric analysis. Pearson Education. Inc. New York. 2003. – 1026 p.
- Lyukyanets A., Ryazantsev S.V. Economic and socio-demographic effects of global climate change // International Journal of Economics and Financial. 2016. Vol. 6 (8). P. 268–273.
- Mann H.B. Non-parametric tests against trend // Econometrica. 1945. Vol. 13. P. 163–171. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Page E.S. Continuous inspection schemes // Biometrika. 1954. Vol. 41 (1/2). P. 100–115. <https://doi.org/10.2307/2333009>
- Price K.V., Storn R.M., Lampinen J.A. Differential evolution: A practical approach to global optimization 1st ed. Springer. Berlin. 2005. – 558 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-31306-0>
- Romanello M., McGushin A., Di Napoli C., Drummond P., Hughes N., Jamart L., Kennard H., Lampard P., Rodriguez B.S., Arnell N., Ayeb-Karlsson S., Belesova K., Cai W., Campbell-Lendrum D., Kniveton D. et al. The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future // The Lancet. 2021. Vol. 398 (10311). P. 1619–1662. [https://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01787-6](https://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01787-6)
- Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // Journal of the American Statistical Association. 1968. Vol. 63. P. 1379–1389. <https://dx.doi.org/10.2307/2285891>
- Storn R., Price K. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // Journal of Global Optimization. 1997. Vol. 11 (4). P. 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Subash N., Singh S.S., Priya N. Variability of rainfall and effective onset and length of the monsoon season over a sub-humid climatic environment // Atmospheric Research. 2011. Vol. 99 (3). P. 479–487. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.11.020>
- Vautard R., Yiou P., Chil M. Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals // Physica D. 1992. Vol. 58. P. 95–126. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(92\)90103-T](https://doi.org/10.1016/0167-2789(92)90103-T)

## FEATURES OF TEMPORAL VARIATIONS IN AVERAGE MONTHLY AIR TEMPERATURE VALUES ACCORDING TO DATA FROM THE ZUGSPITZE WEATHER STATION

© 2025 S. A. Riabova\*

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*E-mail: riabovasa@mail.ru*

This study analyzes the temporal dynamics of average monthly and average annual air temperature values based on instrumental observations of temperature variations at the Zugspitze high-altitude weather station from August, 1900 to July, 2025. Several methods were used to isolate the trend component and locate the change point of temperature variations: the Mann–Kendall test, the Theil–Sen estimator, the singular spectrum analysis method, the CUSUM algorithm, and the segmented regression analysis method. It was found that air temperature changes tend to increase over time. Identification of the trend component using the singular spectrum analysis method demonstrated an increase in the rate of temperature increase starting around 1969 is confirmed by the results obtained using the segmented regression analysis method and the CUSUM algorithm. The two-segment regression provides a good approximation of temperature variations over the period from 1901 to 2024 (the coefficient of determination is 0.61).

**Keywords:** air temperature, singular spectrum analysis, Mann–Kendall test, Theil–Sen estimator, segmented regression, CUSUM algorithm.