

Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 7—20.
Hydrometeorology and Ecology. 2026;(82):7—20.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.501.724:551.583]:519.6
doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-7-20

Бифуркации в климатических рядах температур и чувствительность их оценок к погрешностям в исходных данных

*Анатолий Дмитриевич Кузнецов,
Светлана Викторовна Крюкова, Ольга Станиславовна Сероухова,
Татьяна Евгеньевна Симакина, Карина Левановна Восканян*

Российский государственный гидрометеорологический университет,
kuznetsov1946@inbox.ru

Аннотация. В работе исследуется влияние инструментальных погрешностей измерения температуры на определение моментов времени (точек бифуркации), соответствующих смене климатических режимов в долгосрочных временных рядах. На примере контрастных климатических зон — арктической (станция Баренцбург) и субтропической (станция Сочи) — выполнен сравнительный анализ чувствительности алгоритма обнаружения бифуркаций к уровню шума в данных. Показано, что даже погрешности, соответствующие современным стандартам точности измерений (десятые доли градуса), могут приводить к неоднозначности в определении момента климатического сдвига, «размывая» его положение на несколько десятилетий. Результаты подчеркивают необходимость учета метрологической неопределенности исходных данных при интерпретации моментов резких климатических изменений, полученных методами нелинейной динамики.

Ключевые слова: бифуркация, климатические временные ряды, изменение климата, погрешность измерений, статистическое моделирование.

Для цитирования: Кузнецов А. Д., Крюкова С. В., Сероухова О. С., Симакина Т. Е., Восканян К. Л. Бифуркации в климатических рядах температур и чувствительность их оценок к погрешностям в исходных данных // Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 7—20. doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-7-20.

Original article

Bifurcations in climatic temperature series and the sensitivity of their estimates to errors in the input data

*Anatoly D. Kuznetsov, Svetlana V. Kryukova,
Olga S. Seroukhova, Tatyana E. Simakina, Karina L. Voskanyan*

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Summary. This paper examines the influence of instrumental temperature measurement errors on the determination of time points (bifurcation points) corresponding to climate regime changes in long-term time series. Using contrasting climate zones — Arctic (Barentsburg station) and subtropical (Sochi station) — a comparative analysis of the sensitivity of the bifurcation detection algorithm to data noise is performed. The methodology is based on minimizing the sum of squared deviations (SS) in statistical modeling of random errors with a given standard deviation (SD), followed by approximation of the time series by polynomial intervals. It is shown that even errors corresponding to current World Meteorological Organization (WMO) measurement accuracy standards (tenths of a degree) can lead to ambiguity in determining the moment of a climate shift, “blurring” its position over several decades. The dependence of the reliability of bifurcation point localization on the magnitude of the sk is quantitatively assessed. It is established that the Arctic station is characterized by an earlier and more clearly defined bifurcation transition (1961), while the shift at the Black Sea station occurs later (1981) and demonstrates greater sensitivity to noise. The results emphasize the need to consider the metrological uncertainty of the initial data when interpreting abrupt climate change moments obtained using nonlinear dynamics methods.

Keywords: bifurcation, climate time series, climate change, measurement error, statistical modeling.

For citation: Kuznetsov A. D., Kryukova S. V., Seroukhova O. S., Simakina T. E., Voskanyan K. L. Bifurcations in climatic temperature series and the sensitivity of their estimates to errors in the input data *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(82):(7—20). doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-7-20. (In Russ.).

Введение

Глобальное изменение климата является сложным процессом, характеризующимся нелинейной динамикой и возможностью резких переходов между качественно различными режимами [1, 2]. Особый научный интерес представляют регионы с выраженной чувствительностью к глобальным изменениям, такие как Арктика, где потепление происходит в 2—4 раза быстрее среднемирового, и относительно стабильные субтропические зоны, такие как Черноморское побережье Кавказа, которые могут выступать в качестве «контрольных точек» или зон запаздывающей реакции [3].

Климатическая система как объект с хаотическим поведением все чаще исследуется в рамках теории динамического хаоса и бифуркаций [4, 5]. Такой подход позволяет выйти за рамки анализа линейных трендов и сосредоточиться на выявлении качественных перестроек в её функционировании. Методы нелинейной динамики активно применяются для анализа климатических индексов и рядов наблюдений, позволяя обнаруживать скрытые структурные сдвиги [6, 7].

Климатические временные ряды, как и большинство геофизических данных, неизбежно содержат инструментальные погрешности, шумы оцифровки, а также обусловлены пространственно-временной неоднородностью сети наблюдений. В связи с этим оценка устойчивости индикаторов переломных точек (таких как точка бифуркации) к ошибкам в исходных данных становится важной задачей современной климатологии. Игнорирование метрологической неопределенности может привести к некорректным выводам о времени наступления и природе климатических сдвигов.

Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) устанавливает строгие стандарты точности для метеорологических измерений, обеспечивающие сопоставимость данных в глобальном масштабе. Согласно руководству ВМО [8], требуемая точность (погрешность) измерений температуры воздуха у поверхности составляет $\pm 0,1$ °С для климатологических исследований и $\pm 0,2$ °С для синоптических целей. Фактическая точность современных автоматических метеостанций и поверенных приборов часто находится в пределах $0,1$ — $0,3$ °С. Однако для исторических данных, особенно конца XIX — первой половины XX века, погрешности могли быть существенно выше из-за несовершенства приборов, изменений в условиях их размещения и методик наблюдений. До широкого внедрения стандартных метеорологических будок (1920—1930-е гг.) термометры часто размещались у стен зданий, под навесами или в невентилируемых укрытиях, что вызывало систематические погрешности, связанные с радиационным нагревом и застоем воздуха. Даже после внедрения будок их конструктивные особенности и локация площадки вносили дополнительную переменную составляющую в ошибку измерения. Таким образом, при анализе вековых рядов необходимо учитывать, что реальная ошибка данных может меняться во времени и превышать современные стандарты, что напрямую влияет на надежность выявления тонких нелинейных эффектов.

Основа данной работы заложена в цикле исследований авторского коллектива [9—12], посвященных разработке и адаптации методов обнаружения бифуркаций и смен режимов в метеорологических рядах. В работе [9] был проведен масштабный анализ, подтвердивший применимость концепции смены режимов к климату высоких широт и выявивший периоды синхронных изменений. В исследованиях [10, 11] был апробирован методологический аппарат. Ключевым выводом стало понимание существенного влияния выбора диагностической метрики на точность локализации критической точки. Алгоритмический базис был заложен в статье [12].

Таким образом, настоящее исследование является логическим развитием предыдущих работ и ставит следующие цели:

- провести сравнительный анализ моментов бифуркационных переходов в длинных рядах среднегодовых температур для контрастных климатических зон (Арктика и Черноморское побережье);

- дать количественную оценку влияния инструментальной погрешности данных на неопределенность в определении положения точки бифуркации.

Задачи:

1. Проанализировать ряды среднемесячных температур станций Баренцбург (Арктика) и Сочи (субтропики) по 2025 год.
2. Определить «истинные» (базисные) точки бифуркации в предположении об отсутствии ошибок.
3. Методом статистического моделирования (Монте-Карло) изучить, как внесение в данные случайной погрешности с заданным СКО (sk) влияет на стабильность положения найденной точки бифуркации.
4. Установить пороговые значения погрешности, при которых оценка момента сдвига становится статистически неоднозначной.
5. Дать климатологическую интерпретацию полученных результатов с учетом специфики регионов.

Данные, методы и объекты исследования

Для достижения поставленной цели выбраны две станции, репрезентативные для принципиально разных климатических зон:

* Арктическая морская станция Баренцбург (Шпицберген, Норвегия). Координаты: $78^{\circ}04'$ с.ш., $14^{\circ}13'$ в.д. Климат характеризуется отрицательной среднегодовой температурой, малыми годовыми амплитудами (благодаря отепляющему влиянию ветвей Нордкапского течения), высокой влажностью и сильными ветрами. Зима существенно мягче, чем в континентальной Арктике на той же широте. В работе используются данные с 1947 г. по 2025 г. Выбор начальной даты обусловлен наличием регулярных наблюдений после окончания Второй мировой войны, что позволяет исключить неопределённость, связанную с восстановлением пропущенных значений военного периода. Качество инструментальных наблюдений на станции Баренцбург для послевоенного периода не вызывает сомнений [13].

* Приморская субтропическая станция Сочи (Россия, Краснодарский край). Координаты: $43^{\circ}36'$ с.ш., $39^{\circ}43'$ в.д. Влажный субтропический климат характеризуется мягкой зимой с положительными среднемесячными температурами и жарким влажным летом. Акватория Черного моря выступает термическим буфером, сглаживающим как суточные, так и сезонные, а отчасти и межгодовые колебания температуры. Горный барьер Кавказа защищает от холодных воздушных масс с севера. В работе использован ряд температур с 1870 г. по 2025 г.

Критериями выбора для исследования служили длина непрерывного ряда, репрезентативность для крупного климатического региона, относительная однородность рядов (отсутствие разрывов и документально подтвержденных серьезных перемещений). Для анализа использовались ряды среднегодовой температуры воздуха на высоте 2 м как наиболее показательные для анализа зимнего потепления в Арктике и мягкости зим в субтропиках. Период исследования — по 2025 г. включительно.

Перед анализом ряды среднегодовой температуры станций Баренцбург и Сочи были подвергнуты проверке на наличие неоднородностей, связанных с неклиматическими факторами. Основной анализ проводился на рядах в их исходном виде

с целью оценки влияния суммарной неопределенности, включающей как инструментальный шум, так и потенциальные слабые неоднородности.

В основе использованного метода обнаружения точек бифуркации, подробно изложенного в [9—12], лежит поиск момента времени τ_{bif} , который делит исходный временной ряд T на два отрезка таким образом, что при таком разделении минимизируется целевая функция $SS(\tau)$ — сумма квадратов отклонений для двух-сегментной модели. В данной работе это два полинома первой степени:

$$SS(\tau_{bif}) = \sum_{i=1}^{\tau_{bif}} [T_i - P_1(i)]^2 + \sum_{i=\tau_{bif}+1}^N [T_i - P_2(i)]^2 = \min,$$

$$P_1(i) = a_{11}i + a_{01}, \quad P_2(i) = a_{12}i + a_{02}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$. Здесь P_1 и P_2 — полиномы, подобранные по методу наименьших квадратов для левого и правого отрезков соответственно. Точка τ_{bif} в которой функция $SS(\tau)$ достигает минимума, принимается за момент бифуркации (смены тренда). Результаты применения данного алгоритма к рядам среднегодовых температур станций Сочи и Баренцбург представлены на рис. 1 и рис. 2.

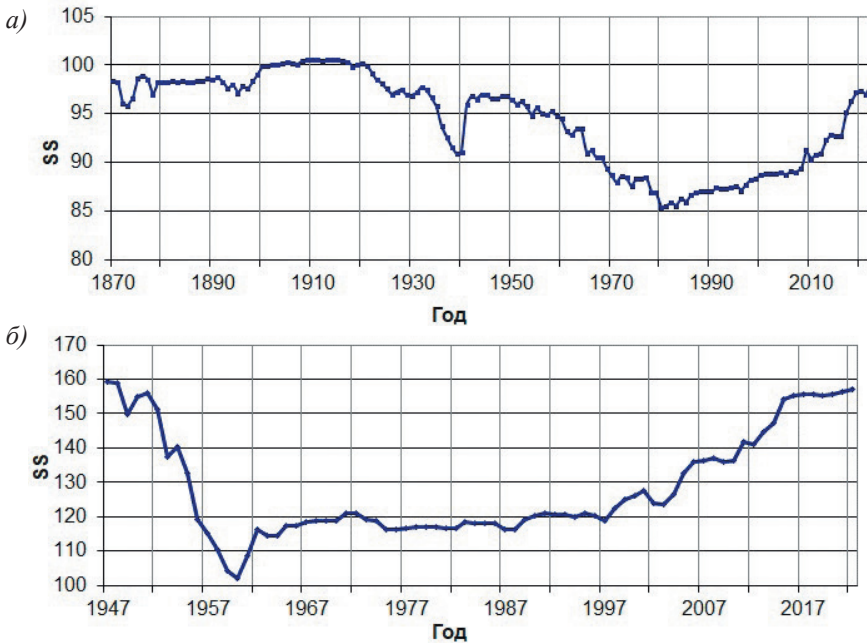


Рис. 1. Зависимость суммы квадратов отклонений SS (ф-ла (1)) от положения точки разделения τ для рядов среднегодовой температуры: а) станция Сочи, б) станция Баренцбург.

Fig. 1. Dependence of the sum of squared deviations SS (formula (1)) on the position of the cutoff point τ for the series of average annual temperature: а) Sochi station, б) Barentsburg station.

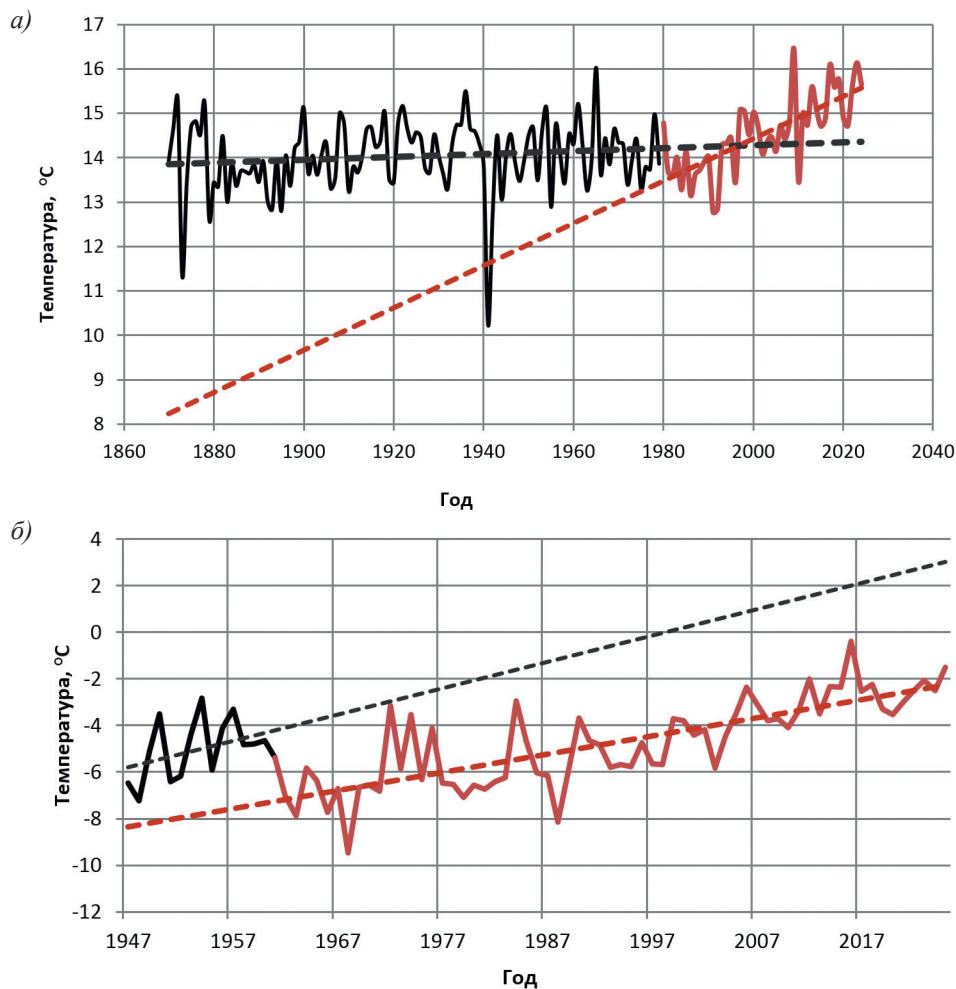


Рис. 2. Аппроксимация временного ряда температур до (черная линия) и после (красная линия) точки бифуркации: а) Сочи: ТБ в 1981 г, б) Баренцбурга: ТБ в 1961 г.

Fig. 2. Approximation of the temperature time series before (black line) and after (red line) the bifurcation point: а) Sochi: TB in 1981, б) Barentsburg: TB in 1961.

Однако на практике возникает проблема неоднозначности решения, возникающая, когда кривая $SS(\tau)$ имеет не один выраженный глобальный минимум, а несколько близких по величине локальных минимумов. Например, для температурного ряда Сочи (рис. 1) абсолютный минимум $SS_{\min} = 85,4$ достигается в 1981 г., тогда как следующий локальный минимум $SS = 85,8$ (отличие $\sim 0,5\%$) наблюдается в 1983 г. Подобная ситуация приводит к различным вариантам аппроксимации исходного ряда. Следовательно, даже незначительные возмущения в исходных данных, сопоставимые с инструментальной погрешностью, могут

«перебрасывать» решение из одного минимума в другой, сдвигая положение точки бифуркации (ТБ).

Для количественной оценки устойчивости найденной точки бифуркации τ_{bif} к ошибкам измерений был применен метод статистического моделирования (Монте-Карло). Исходные допущения: в «истинном» ряду среднегодовой температуры t систематическая ошибка отсутствует. Далее проводилась серия численных экспериментов, в которых случайная инструментальная погрешность моделируется как нормальный шум с нулевым математическим ожиданием и известным СКО = $sk/2$, соответствующим возможной реальной погрешности измерений (от 0,05 °С до 2,0 °С).

Алгоритм моделирования: для каждого уровня sk генерируется 1000 реализаций временного ряда по формуле, имитирующей нормальный шум с ограниченными «хвостами» (для исключения нереалистичных выбросов):

$$dt_{i,j} = sk \left\{ \left[2 \ln(1/Rnd_1) \right]^{0.5} \cos(2\pi Rnd_2) (-1)^i \right\}, \quad (2)$$

где i — порядковый номер члена временного ряда: $i = 1, 2, \dots, N$, N — длина временного ряда; $j = 1, 2, \dots, K$; Rnd_1, Rnd_2 — случайные числа, равномерно распределенные в диапазоне $[0, 1]$, которые определялись заново для каждого значения i и j . Затем для каждой возмущенной реализации заново определяется точка бифуркации.

Выбор количества независимых реализаций случайного шума ($K = 1000$) был сделан на основе анализа сходимости статистических характеристик выходного распределения (положения ТБ) при увеличении числа испытаний. Для этого проведена серия предварительных экспериментов, в которых для фиксированного уровня среднеквадратической погрешности ($sk = 1,0$ °С) моделировалось различное количество возмущенных рядов: $K = 10, 100, 500$ и 1000 . Для каждого K строилась гистограмма распределения полученных оценок ТБ (рис. 3).

Анализ результатов (см. рис. 3) показал:

1. При малом числе реализаций ($K = 10$) гистограмма имеет «грубый» вид с единичными выбросами. Получаемое распределение является нестабильным и неустойчивым: повторение эксперимента с тем же K может дать существенно другую гистограмму. Статистические оценки (мода, разброс) ненадежны.

2. С увеличением K до 100 форма гистограммы начинает стабилизироваться, выявляются основные области концентрации оценок ТБ. Однако оценка вероятностей (высоты столбцов) все еще обладает значительной случайной погрешностью.

3. При $K = 500$ гистограмма приобретает устойчивую, гладкую форму. Положение основного пика (моды) и границы разброса практически перестают меняться при дальнейшем увеличении K .

4. При $K = 1000$ гистограмма демонстрирует статистическую сходимость: ее форма, модальное значение и диапазон разброса полностью стабилизировались. Дополнительное увеличение числа реализаций до 5000 (проверочный прогон) не внесло существенных изменений в оценку плотности распределения.

Таким образом, $K = 1000$ реализаций было выбрано как минимально достаточное количество, обеспечивающее устойчивость и воспроизводимость результирующего распределения оценок ТБ, надежную оценку вероятности попадания

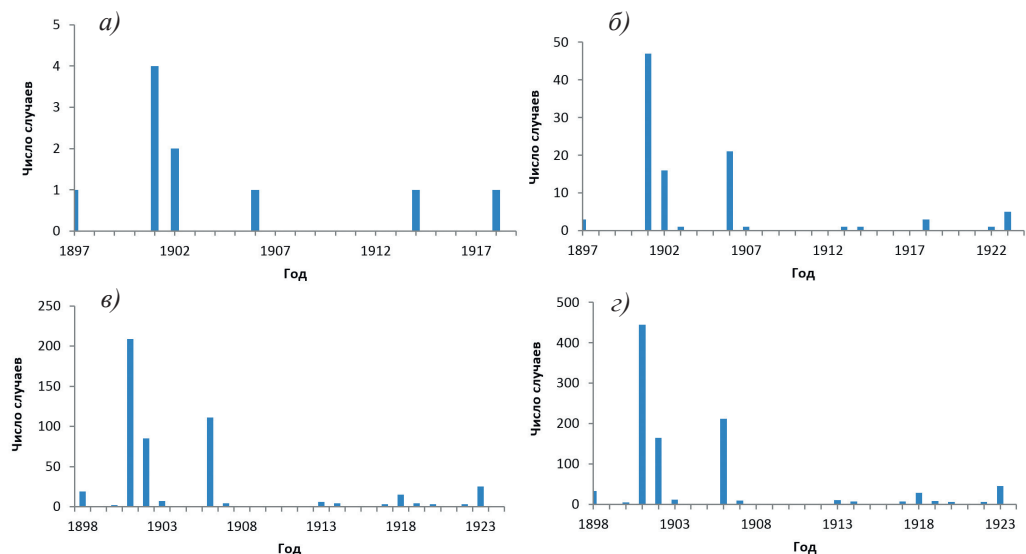


Рис. 3. Гистограммы распределения ТБ по годам при различном числе статистических испытаний K : а) $K = 10$, б) $K = 100$, в) $K = 500$, з) $K = 1000$.

Fig. 3. Histograms of TB distribution by years with different numbers of statistical tests K : а) $K = 10$, б) $K = 100$, в) $K = 500$, з) $K = 1000$.

ТБ в тот или иной год, а также позволило выявить все статистически значимые моды в распределении, что важно для анализа неоднозначности в определении момента бифуркации.

Распределение полученных 1000 значений для каждого sk анализировалось также с помощью гистограмм. Достоверность определения бифуркации в исходный год τ_{true} рассчитывается как процент реализаций, а ширина разброса (диапазон лет, в которые «попадает» точка бифуркации) служит мерой неопределенности.

Результаты

Для Сочи точка бифуркации приходится на 1981 г. Она соответствует резкому переходу от периода с относительно стабильными или слабо положительными трендами к периоду интенсивного зимнего потепления. Для Баренцбурга точка бифуркации определена как 1961 г. Это указывает на более раннее начало выраженного изменения температурного режима зимних месяцев в Арктическом регионе.

Некоторые результаты моделирования погрешности для станции Баренцбург представлены на рис. 4, 5. При $sk \leq 0,1$ °C достоверность близка к 100 %. Уже при $sk = 0,3$ °C она падает до ~99 %, а при $sk = 0,5$ °C — до ~86 %. Это означает, что при погрешности, формально соответствующей стандартам ВМО для климатологии (0,1 °C), результат остается устойчивым. Однако при погрешности в 0,3 °C и более однозначность определения 1961 г. как точки бифуркации теряется.

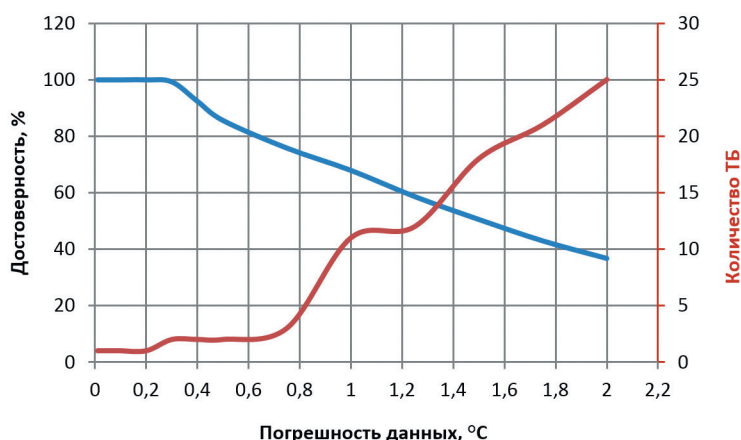


Рис. 4. Зависимость достоверности определения точки бифуркации от погрешности исходных значений температуры на станции 20107 Баренцбург.

Fig. 4. Dependence of the reliability of TB determination on the error of the initial temperature values at the 20107 Barentsburg station.

С ростом СКО распределение возможных точек бифуркации становится все шире. Гистограммы из унимодальных превращаются в мультимодальные. Появляются «ложные» пики в другие годы (рис. 5). В качестве примера рассмотрим результаты ряда численных экспериментов. При СКО = 0,25 °C разброс составляет 2 года (1960 г. — 143 случая и 1961 г. — 857 случаев). При СКО = 0,5 °C — уже 32 года (1957—1989 гг.), а при СКО = 0,9 °C разброс составляет 53 года. Два последних случая иллюстрируют гистограммы на рис. 5. На этих гистограммах для наглядности исключено число самых частых случаев — данные за 1960 г. и 1961 г.

Для Сочи характерна более высокая чувствительность алгоритма к шуму при схожих значениях СКО: как видно на рис. 6, даже при СКО = 0,1 °C распределение точек бифуркации имеет значительный разброс вокруг 1981 г. При СКО = 0,5 °C диапазон возможных оценок охватывает практически всю вторую половину XX века, а функция $SS(\tau)$ для разных реализаций демонстрирует высокую вариабельность положения минимумов.

Итоговые результаты: «истинная» ТБ, пороговая погрешность и диапазон разброса ТБ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Итоговые результаты

Final results

Станции	ТБ	СКО критическое, °C	Количество ТБ при СКО = 0,5 °C	Диапазон разброса ТБ при СКО = 0,5 °C
Баренцбург	1961	0,3	8	32 года
Сочи	1981	0,2	26	44 года

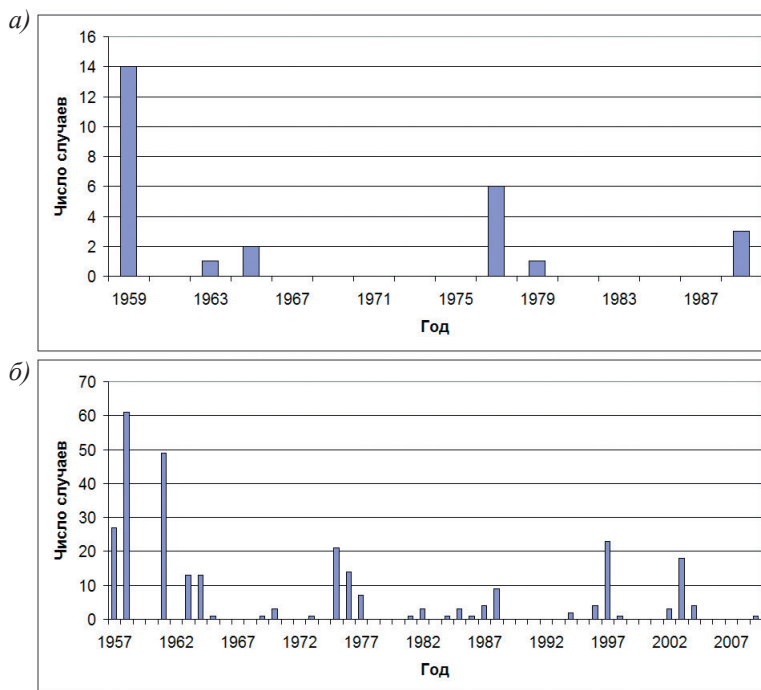


Рис. 5. Гистограмма распределения точки бифуркации в Баренцбурге при погрешности исходных значений температуры 0,5 °С, $K = 1000$ (а) и 0,9 °С, $K = 1000$ (б).

Fig. 5. Histogram of the distribution of TB in Barentsburg with an error in the initial temperature values of 0,5 °С, $K = 1000$ (a) and 0,9 °С, $K = 1000$ (b).

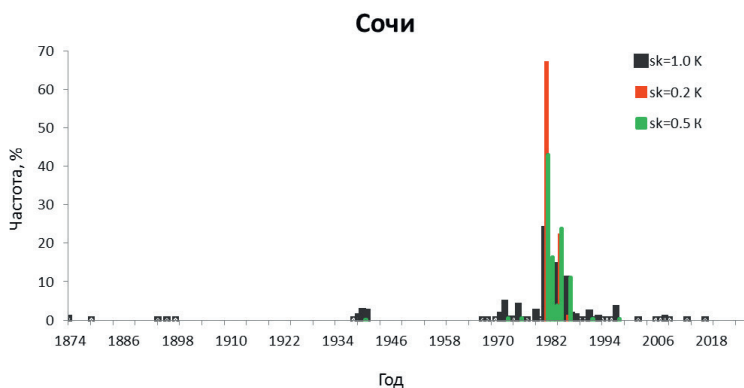


Рис. 6. Гистограммы распределения точки бифуркации по данным Сочи за 156 лет при sk равным 0,2; 0,5 и 1,0 °С; $K = 1000$.

Fig. 6. Histograms of TB distribution according to Sochi data for 156 years with an error of 0,2; 0,5 and 1,0 °С; $K = 1000$.

Обсуждение

Изменения в многолетних рядах могут быть вызваны климатическими и инструментальными причинами. Обнаруженные точки бифуркации (1961 г. — для Баренцбурга и 1981 г. — для Сочи) в контексте настоящего исследования являются лишь «истинными» значениями в системе нашего моделирования. Вопрос о том, какая именно причина (антропогенный фактор, естественная изменчивость или их комбинация) привела к перестройке температурного режима в эти годы, требует отдельного глубокого исследования с привлечением дополнительных данных и методов и будет рассмотрен на следующем этапе работы.

Ниже, в порядке предварительной гипотезы, требующей дальнейшей проверки, мы кратко остановимся на возможной климатологической интерпретации выявленных точек бифуркации.

Для Баренцбурга (1961 г.) наиболее вероятна связь с нелинейными арктическими обратными связями. К этому времени могли достигнуть порогового значения процессы, связанные с сокращением морского льда в Баренцевом и Карском морях, что привело к резкому усилению альбедо и температурной обратной связи именно в зимний период. Кроме того, этот период, возможно, совпадает с усилением адвекции теплых атлантических вод в Арктику.

Для Сочи (1981 г.) бифуркация, вероятно, связана с изменением режимов крупномасштабной атмосферной циркуляции над Европой и Средиземноморьем, влияющих на адвекцию воздушных масс на Черноморское побережье Кавказа. Сглаживающее влияние Черного моря как термического буфера может приводить к более позднему и менее резкому проявлению глобальной тенденции в регионе. Также нельзя исключать влияние изменчивости Восточно-Атлантического колебания.

Для обеих станций существует пороговое значение погрешности (около $0,2$ — $0,3$ °C), после превышения которого оценка момента бифуркации перестает быть статистически однозначной. Полученный порог погрешности находится в полном соответствии с известными историко-метеорологическими данными. Для середины XX века, когда происходил выявленный для Баренцбурга переход (1961 г.), паспортная погрешность хороших стеклянных термометров составляла около $0,2$ — $0,3$ °C, а с учетом методических погрешностей считывания и возможных микроклиматических эффектов общая неопределенность могла быть еще выше. Для более раннего периода (конец XIX — начало XX вв.) погрешности измерений, достигавшие $0,5$ — $1,0$ °C и более, из-за несовершенных условий установки и градуировки приборов делают однозначное определение моментов тонких климатических перестроек по таким данным трудной задачей. Это подчеркивает важность проведенного анализа на чувствительность и необходимость использования методов корректировки неоднородности при работе с вековыми рядами.

Таким образом, погрешность на уровне $0,2$ — $0,3$ °C, часто рассматриваемая как приемлемая для долгосрочных рядов, является критической для надежного обнаружения момента резкого климатического перехода методом анализа смены трендов. Это ставит под вопрос однозначность интерпретации тонких структур в исторических данных.

Более высокая чувствительность алгоритма к шуму для субтропической станции (Сочи) по сравнению с арктической (Баренцбург), вероятно, связана с меньшей амплитудой климатического сигнала на фоне естественной изменчивости в субтропиках. В связи с этим «слабые» сигналы в регионах с умеренным изменением климата требуют данных исключительно высокого качества для корректного нелинейного анализа. В Арктике мощный сигнал потепления оказывается более устойчивым к помехам.

Заключение

На примере анализа среднегодовых температур станций Баренцбург (Арктика) и Сочи (субтропики) показано, что инструментальные погрешности в исходных рядах, даже соответствующие современным и историческим стандартам точности измерений ВМО (десятые доли градуса), могут существенно влиять на определение ключевых характеристик климатической системы, таких как моменты смены режима (точки бифуркации).

Методом статистического моделирования установлено, что среднеквадратическая ошибка на уровне 0,2—0,3 °С способна «размывать» оценку момента климатического перехода на несколько десятилетий, приводя к появлению множества квазиоптимальных решений и ставя под сомнение однозначность идентификации переломной точки.

Обнаружены региональные различия: для арктической станции Баренцбург характерен более ранний (1961 г.) и статистически более устойчивый к шуму бифуркационный переход, что согласуется с концепцией «арктического усиления». Для субтропической станции Сочи переход (1981 г.) проявляется позже и демонстрирует большую чувствительность к погрешностям данных, что может быть связано с меньшей амплитудой климатического сигнала и сглаживающим влиянием моря.

Таким образом, игнорирование метрологической неопределенности при анализе долгосрочных климатических рядов методами нелинейной динамики может привести к некорректным выводам о динамике, устойчивости и порогах перехода системы, поэтому количественная оценка чувствительности получаемых результатов к погрешностям исходных данных должна стать обязательным элементом методики при исследовании климатических бифуркаций и точек перелома.

Перспективы дальнейших исследований связаны с применением предложенного подхода к большему числу станций в каждом регионе, анализу рядов за другие сезоны, а также с использованием более сложных методов обнаружения бифуркаций и оценкой их сравнительной устойчивости к шуму.

Список литературы

1. Lenton T. M., Held H., Kriegler E. et al. Tipping elements in the Earth's climate system // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008. Vol. 105. No. 6. P. 1786—1793. doi: 10.1073/pnas.0705414105.
2. Scheffer M., Bascompte J., Brock W. A. et al. Early-warning signals for critical transitions // *Nature*. 2009. Vol. 461. P. 53—59. doi:10.1038/nature08227.

3. IPCC, 2023: 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 and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
4. Григорьев А. А., Кондратьев К. Я. Динамика климатической системы. СПб.: Наука. 2001. 526 с.
5. Шерстюков Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 2021. 221 с.
6. Easterling D. R., Peterson T. C. The effect of artificial discontinuities on recent trends in minimum and maximum temperatures // *Atmospheric Research*. 1995. Vol. 37. P. 19—26. doi:10.1016/0169-8095(94)00064-K.
7. Friederike E. L. Attribution of Extreme Events to Climate Change // *Annual Review of Environment and Resources*. 2023. Vol. 48. P. 315—338. doi:10.1146/annurev-environ-112621-083538.
8. WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO—No. 8). 2018 edition.
9. Восканян К. Л., Иванова Т. И., Кузнецов А. Д. и др. Анализ смены периодов климатической стабильности северной территории России // *Гидрометеорология и экология*. 2022. № 67. С. 207—220. doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-207-220.
10. Кузнецов А. Д., Колинбет Л. В., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. Анализ положения точки бифуркации во временных рядах годовых сумм осадков // *Тр. Сиб. регион. НИИ гидрометеорологии*. 2021. № 107. С. 180—185.
11. Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. Влияние метрик на определение точек бифуркации во временных рядах метеорологических величин // *Гидрометеорология и экология*. 2020. № 59. С. 28—40. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-28-40.
12. Кузнецов А. Д., Саенко А. Г., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. Алгоритмы поиска момента смены тренда во временных рядах метеорологических величин // *Вестник Тверского гос. ун-та. Сер. Прикл. математика*. 2019. № 3. С. 74—89. doi: 10.26456/vtprmk541.
13. Демин В. И., Иванов Б. В., Ревина А. Д. Восстановление ряда приземной температуры воздуха на Российской станции в поселке «Баренцбург» (Шпицберген) // *Российская Арктика*. 2020. № 9. С. 30—40. doi: 10.24411/2658-4255-2020-120093.

References

1. Lenton T. M., Held H., Kriegler E. et al. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008; 105(6): 1786—1793. doi: 10.1073/pnas.0705414105.
2. Scheffer M., Bascompte J., Brock W. A. et al. Early-warning signals for critical transitions. *Nature*. 2009; (461): 53—59. doi:10.1038/nature08227.
3. IPCC, 2023: 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 and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
4. Grigoriev A. A., Kondratiev K. Ya. *Dinamika klimaticheskoy sistemy = Dynamics of the climate system*. St. Petersburg: Nauka, 2001: 526 p. (In Russ.).
5. Sherstyukov B. G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'niye svyazi, prognozy = Oscillatory system of climate, resonances, long-distance communications, forecasts*. Obninsk, VNIIGMI-MCD, 2021: 221 p. (In Russ.).
6. Easterling D. R., Peterson T. C. The effect of artificial discontinuities on recent trends in minimum and maximum temperatures. *Atmospheric Research*. 1995; (37): 19—26. doi:10.1016/0169-8095(94)00064-K.
7. Friederike E. L. Attribution of Extreme Events to Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*. 2023; (48): 315—338. doi:10.1146/annurev-environ-112621-083538.
8. WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO—No. 8). 2018 edition.
9. Voskanyan K. L., Ivanova T. I., Kuznetsov A. D., Nikitina V. S. et al. Analysis of the change in periods of climatic stability in the northern territory of Russia. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022; (67): (207—220). doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-207-220. (In Russ.).
10. Kuznetsov A. D., Kolinbet L. V., Seroukhova O. S., Simakina T. E. Analysis of the position of the bifurcation point in the time series of annual precipitation amounts. *Tr. Sib. region. NII gidrometeorologii =*

- Proceedings of the Siberian Regional Research Institute of Hydrometeorology*. 2021; (107):(180—185). (In Russ.).
11. Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S., Simakina T. E. Influence of metrics on determination of bifurcation points in time series of meteorological values. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2020; (59): (28—40). doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-28-40. (In Russ.).
 12. Kuznetsov A. D., Saenko A. G., Seroukhova O. S., Simakina T. E. Algorithms for Searching for the Moment of Trend Change in Time Series of Meteorological Quantities. *Vestnik Tverskogo gos. un-ta. Ser. Prikl. Matematika = Bulletin of Tver State University. Series: Applied Mathematics*. 2019; (3):(74—89). doi:10.26456/vtppmk541. (In Russ.).
 13. Demin V. I., Ivanov B. V., Revina A. D. Reconstruction of air temperature series at Russian station in Barentsburg (Svalbard). *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2020; (9):(30—40). doi: 10.24411/2658-4255-2020-120093. (In Russ.).

Информация об авторах

Кузнецов Анатолий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет; kuznetsov1946@inbox.ru.

Крюкова Светлана Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет; krukos@rambler.ru.

Сероухова Ольга Станиславовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет; seroukhova@inbox.ru.

Симакина Татьяна Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет; tatiana; simakina@gmail.com.

Восканян Карина Левановна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета; kvosia@mail.ru.

Information about authors

Kuznetsov Anatoly Dmitrievich, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Kryukova Svetlana Viktorovna, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Seroukhova Olga Stanislavovna, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Meteorology, Climatology, and Atmospheric Protection, Russian State Hydrometeorological University.

Simakina Tatyana Evgenievna, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Voskanyan Karina Levonovna, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 26.01.2026

Принята в печать 27.02.2026

The article was received on 26.01.2026
The article was accepted on 27.02.2026