

УДК 681.518:551.50:551.501

АЛГОРИТМ ПОИСКА МОМЕНТА СМЕНЫ ТRENDA ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Кузнецов А.Д., Саенко А.Г., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.

Российский государственный гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 12.08.2019, после переработки 18.09.2019.

Предложен алгоритм нахождения точки бифуркации во временном ряду, выполнена его реализация по временным рядам температур воздуха. Проведено моделирование влияния погрешности измерений на устойчивость нахождения точки бифуркации.

Ключевые слова: временные ряды метеорологических величин, анализ временных рядов, временной тренд, точка бифуркации.

Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. № 3. С. 74–89.
<https://doi.org/10.26456/vtprm541>

Введение

Анализ временных рядов метеорологических элементов широко используется как в климатических исследованиях, так и для целей прогноза, в том числе с наименьшей заблаговременностью – наукастинга [1,2]. Существует большое количество методов обработки стационарных временных рядов [3,4,5]. Однако, климатические факторы и метеорологические элементы характеризуются значительной изменчивостью, имеющей сложную стохастически-детерминированную физическую природу. Соотношение случайной и закономерной составляющих общей изменчивости временного ряда оценивается путем выявления и удаления статистически значимых монотонных и циклических трендов [6]. В результате этого существенно уменьшается общая дисперсия исследуемого показателя, что повышает надежность и точность его вероятностной и прогнозной оценок.

Для сверхкраткосрочного и текущего прогнозов временных рядов метеорологических или экологических элементов пользуются экстраполяцией текущих значений на будущее [2]. Однако методы экстраполяции допустимы в рамках одного процесса, но не дают положительного результата в период их смены. Поэтому большинство задач анализа временных рядов упираются в вопрос: происходит ли смена господствующего процесса, порождающего данный временной ряд, на протяжении исследуемого периода. В качестве иллюстрации сказанного на Рис. 1 представлен временной ряд концентрации тропосферного озона, измеренный в Санкт-Петербурге зимой 2018-2019 гг. [7]. Визуальный анализ не позволяет дать однозначный ответ, содержит ли данный ряд возрастающий линейный тренд, или он состоит из трех интервалов с разной тенденцией развития, подчиняющейся

разным процессам. Рис. 1а – общий ряд с линейным трендом, надежность которого 0,29 (коэффициент детерминации); Рис. 1б – ряд разбит на три интервала, надежность тренда на каждом – 0,47, 0,85 и 0,92 соответственно.

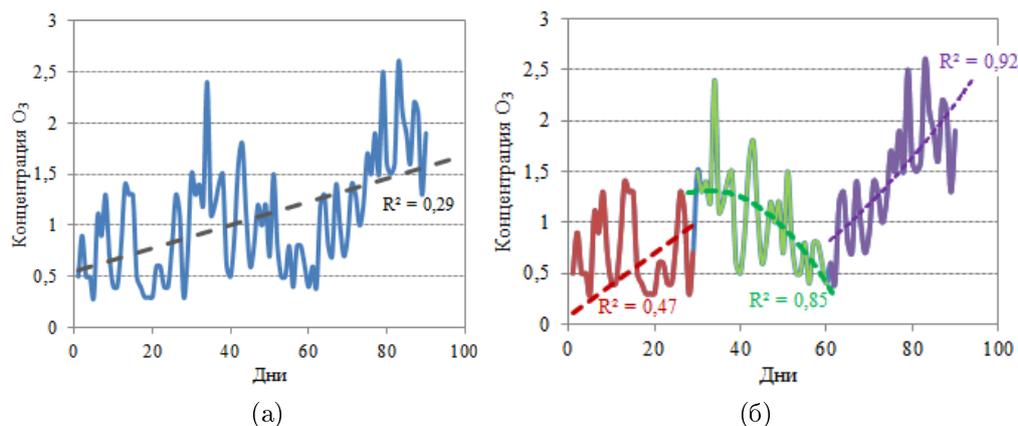


Рис. 1: Субъективный подход к анализу временного ряда концентрации тропосферного озона, измеренного в Санкт-Петербурге зимой 2018-2019 гг.

Таким образом, одним из этапов исследования различных временных рядов является определение наличия моментов времени смены процессов, которым подчинялось поведение временного ряда. Момент времени в исследуемом ряду, соответствующий резкому изменению характера протекающего процесса, т. е. смене тренда, можно считать «точкой бифуркации». В интервалах между бифуркациями поведение системы предсказуемо, оно определяется и случайными, и закономерными факторами. Для нахождения положения точки бифуркации возможно использование тренда в качестве математической модели отрезков временного ряда [8]. Однако такой подход наталкивается на трудности, в частности, связанные с тем, что не существует «автоматического» способа обнаружения тренда во временном ряду. Более того, нет даже единого формального определения тренда.

Целью данной работы является построение методики поиска точек бифуркации на основе анализа временного ряда, отражающего поведение системы.

1. Алгоритм поиска точек бифуркации

В основе алгоритма определения положения точек бифуркации лежит сравнение между собой разных отрезков временного ряда. Задача решается заменой отрезков временного ряда их математической моделью. В качестве моделей могут быть использованы полиномы разных степеней, начиная от полинома нулевой степени. При таком подходе каждая степень полинома определяет геометрическую форму отрезков временного ряда между точками бифуркации. Для полинома нулевой степени это число, которое будет определять на графике временного ряда положение прямой линии, параллельной горизонтальной оси времени (так называемый метод K -средних). Для полинома первой степени – это отрезки прямых, для полинома второй степени – это параболы и т. д.

Таким образом, определение положения точек бифуркации включает следующие этапы:

- формирование на основе прямого перебора отрезков разной длины;
- построение для них математических моделей;
- оценка успешности каждого такого разбиения с помощью одного или нескольких количественных критериев, рассчитываемых с использованием соответствующих метрик [9].

Рассмотрим алгоритм нахождения положения точки бифуркации с использованием полинома нулевой степени. В этом случае значения всего временного ряда аппроксимируются двумя горизонтальными линиями, граница между которыми определяет положение точки бифуркации.

Пусть имеется временной ряд из N значений $y(x)$: $[x_i, y_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$. Разделим этот ряд на два отрезка: $[1, n_1]$ и $[n_1+1, N]$ (при таком разделении значение n_1 может меняться от 2 до $N - 1$, а общее число таких разделений будет равно $N - 3$). Вычислим при каждом таком разбиении для каждого отрезка два соответствующих им параметра по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{n_1} y_i, \quad (1)$$

$$a_1 = \frac{1}{N_2} \sum_{i=n_1+1}^N y_i, \quad (2)$$

где $N_1 = n_1$ и $N_2 = N - n_1$.

Оценим «близость» полученных параметров значениям временного ряда, используя метрику SS – аналог минимизации значения среднеквадратического отклонения тренда от значений временного ряда (набор метрик, которые могут быть использованы для этой же цели, рассмотрены авторами в работах [10, 11]). Рассмотрев все $N - 3$ значений параметра SS , найдем то значение n_1 , при котором будет выполняться условие:

$$SS = \sum_{i=1}^{n_1} (a_0 - y_i)^2 + \sum_{i=n_1+1}^N (a_1 - y_i)^2 = \min. \quad (3)$$

Найденное таким образом значение n_1 и будет определять положение точки бифуркации временного ряда при использовании полинома нулевой степени и метрики (3).

Рассмотрим алгоритм нахождения положения точки бифуркации с использованием полинома первой степени.

Проведя разделение временного ряда на два отрезка так, как это было описано выше, вычислим для каждого отрезка две пары коэффициентов линейного временного тренда по формулам:

$$a_{11} = \frac{n_1 \sum_{i=1}^{n_1} y_i x_i - \sum_{i=1}^{n_1} y_i \sum_{i=1}^{n_1} x_i}{n_1 \sum_{i=1}^{n_1} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n_1} x_i\right)^2}, \quad a_{01} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} y_i - a_{11} \sum_{i=1}^{n_1} x_i, \quad (4)$$

$$a_{12} = \frac{(N - n_1) \sum_{i=n_1+1}^N y_i x_i - \sum_{i=n_1+1}^N y_i \sum_{i=n_1+1}^N x_i}{(N - n_1) \sum_{i=n_1+1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=n_1+1}^N x_i \right)^2},$$

$$a_{02} = \frac{1}{(N - n_1)} \sum_{i=n_1+1}^N y_i - a_{12} \sum_{i=n_1+1}^N x_i. \quad (5)$$

Тогда положение точки бифуркации определяется таким номером n_1 , для которого выполняется следующее условие (считая, что ряд эквидистантный и можно провести следующую замену: $x_i = i$):

$$SS = \sum_{i=1}^{n_1} (a_{01} + a_{11}i - y_i)^2 + \sum_{i=n_1+1}^N (a_{02} + a_{12}i - y_i)^2 = \min. \quad (6)$$

Для оценки «эффективности» произведенного разделения ряда на два отрезка с использованием полиномов нулевой и первой степеней можно воспользоваться сравнением дисперсии всего ряда $\sigma_{\text{ряда}}$ и суммарной дисперсии $\sigma_{\text{ступ}}$ двух его отрезков, вычисленных по формуле:

$$\sigma_{\text{ступ}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 \cdot N_1 + \sigma_2^2 \cdot N_2}{(N_1 + N_2 - 1)}}, \quad (7)$$

где N_1 и N_2 – длина первого и второго отрезка ряда, разделенные точкой бифуркации, σ_1 и σ_2 – среднеквадратическое отклонение значений двух отрезков временного ряда от двух отрезков линейного тренда.

Для оценки значимости проведенного разделения сравним значение критерия Фишера:

$$F = \frac{\sigma_{\text{ряда}}^2}{\sigma_{\text{ступ}}^2} \quad (8)$$

с критическим значением $F_{\text{кр}}$.

Если выполняется неравенство $F > F_{\text{кр}}$, то будем считать, что проведенное разделение статистически значимо с заданной при определении $F_{\text{кр}}$ доверительной вероятностью α .

Аналогичным образом, для задания формы временных трендов могут быть рассчитаны коэффициенты полиномов и более высоких (чем первый) порядков.

2. Примеры использования предлагаемого алгоритма

Пример 1. Рассмотрим временной ряд температуры воздуха, состоящий из $N = 500$ значений, измеренных автоматической метеорологической станцией РГГ-МУ с дискретностью 15 мин [12].

Для поиска точек бифуркации в данном временном ряду применили алгоритм тренда нулевой и первой степеней. Результаты представлены на Рис. 2.

Верхний ряд графиков представляет собой временные ряды с наложенными на них трендами нулевого (Рис. 2а) и первого порядка (Рис. 2б). Нижний ряд графиков: (Рис. 2в) и (Рис. 2г) – значения параметра SS при изменении положения

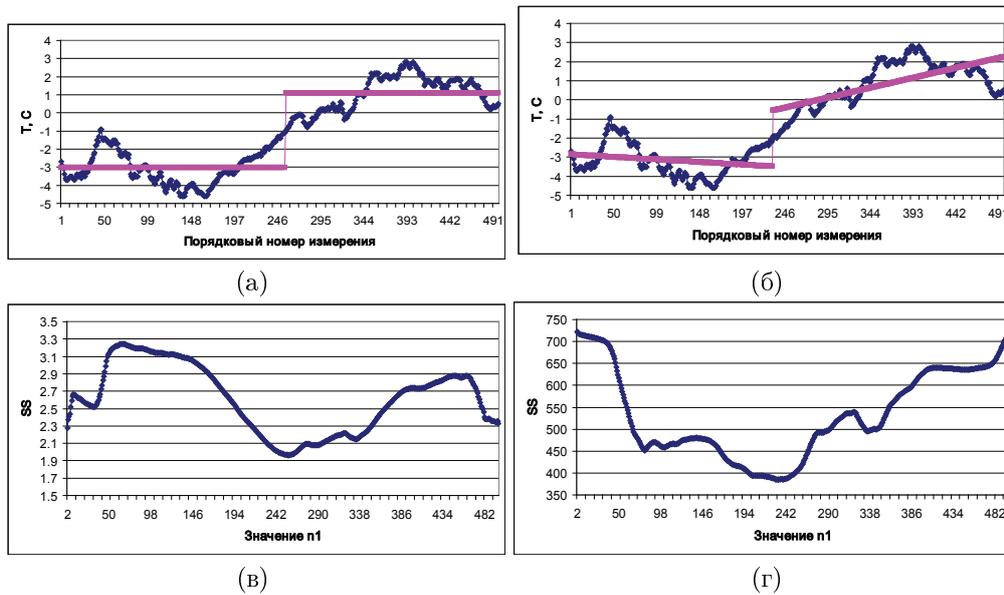


Рис. 2: Сопоставление результатов определения положения точки бифуркации двумя методами: алгоритм тренда нулевой (а), (в) и первой (б), (г) степеней (пояснения в тексте)

точки n_1 от 2 до $N - 3$, минимум которого соответствует положению точки бифуркации. Первый метод обнаружил положение точки бифуркации для $i = 257$, второй – для $i = 233$.

Для оценки «эффективности» произведенного разделения ряда на два отрезка вычислим дисперсии всего ряда $\sigma_{\text{ряда}}$ и дисперсии $\sigma_{\text{ступ}}$ двух отрезков по формуле (7): $\sigma_{\text{ряда}} = 5.19 \text{ } ^\circ\text{C}$; $\sigma_{\text{ступ}_1} = 0.94 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $\sigma_{\text{ступ}_2} = 0.77 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Для оценки значимости проведенного разделения воспользуемся критерием Фишера (8): $F_0 = 30.61$, $F_1 = 45.66$; $F_{\text{кр}} = 1.23$.

В обоих случаях при уровне значимости $\alpha = 0.95$ выполняется неравенство $F > F_{\text{кр}}$, т.е. проведенное разделение статистически значимо. Однако во втором случае значение среднеквадратического отклонения значительно меньше, что указывает на более эффективное использование полинома первой степени для определения положения точки бифуркации по сравнению с использованием для той же цели полинома нулевой степени (двух горизонтальных линий).

Более наглядно различие двух подходов иллюстрирует Рис. 3, где рассмотренные алгоритмы применены для поиска точки бифуркации в двух временных рядах температуры воздуха с дискретностью 15 мин.: протяженностью $N = 2202$ ((а) и (б)) и $N = 495$ ((в) и (г)) значений.

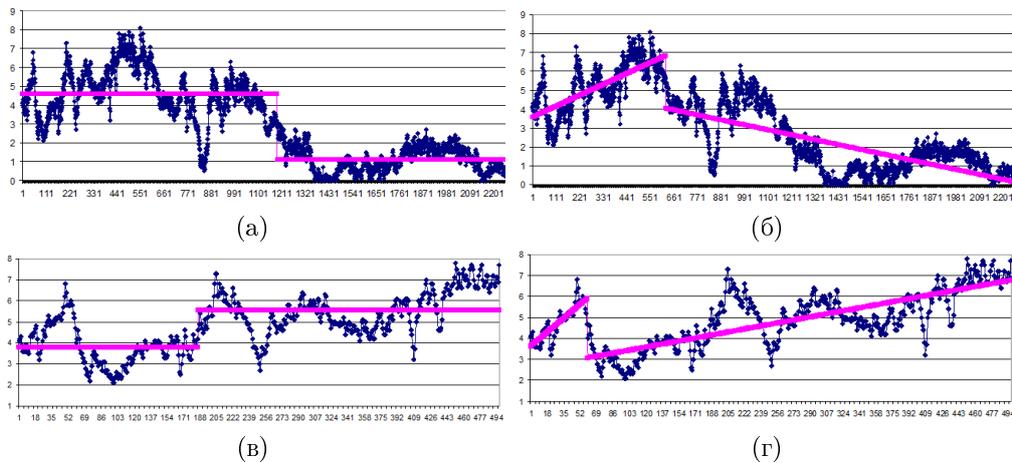


Рис. 3: Сопоставление результатов определения положения точки бифуркации двумя методами: (а) и (в) – полиномами нулевой степени, (б) и (г) – полиномами первой степени

3. Анализ влияния порядка полинома на определение положения точки бифуркации

Анализировалось влияние порядка трендов, используемых для аппроксимации отрезков временного ряда, на положение точки бифуркации. При проведении численных экспериментов в качестве исходного был взят ряд средней глобальной температуры Земли на уровне 2 м с дискретностью 1 год [8]. Степень полинома варьировалась в диапазоне от 0 до 3.

Типичные результаты, полученные при изменении степени полинома, иллюстрирует Рис. 4. Здесь Рис. 4 (а), (в), (д) и (ж) – это положения аппроксимирующей временной ряд трендов, описываемых, соответственно, полиномами нулевого, первого, второго и третьего порядков. При этом положение точки бифуркации по мере увеличения степени полинома, соответственно, меняется следующим образом: $n_1 = 57$ (1925 год), $n_1 = 33$ (1901 год), $n_1 = 55$ (1923 год) и $n_1 = 55$ (1923 год). Рис. 4 (б), (г), (е) и (з) показывают, как по мере увеличения степени полинома меняется временная изменчивость используемой для определения положения точки бифуркации метрики. Повышение степени полинома приводит к более четкому экстремуму кривой значений метрики SS . Так, на Рис. 4б кривая SS имеет несколько локальных минимумов, на Рис. 4г четкий экстремум отсутствует, «минимальное плато» занимает промежуток длительностью в 25 лет, на Рис. 4е присутствуют кроме абсолютного минимума еще «квазiminимум» несколькими годами ранее, и только на Рис. 4з, соответствующим полиному 3-ей степени, наблюдается четкий глобальный минимум, однозначно указывающий на год точки бифуркации. Данный пример наглядно иллюстрирует, насколько, казалось бы, объективный метод определения положения точки бифуркации может быть субъективен, несмотря на использование строгих количественных оценок.

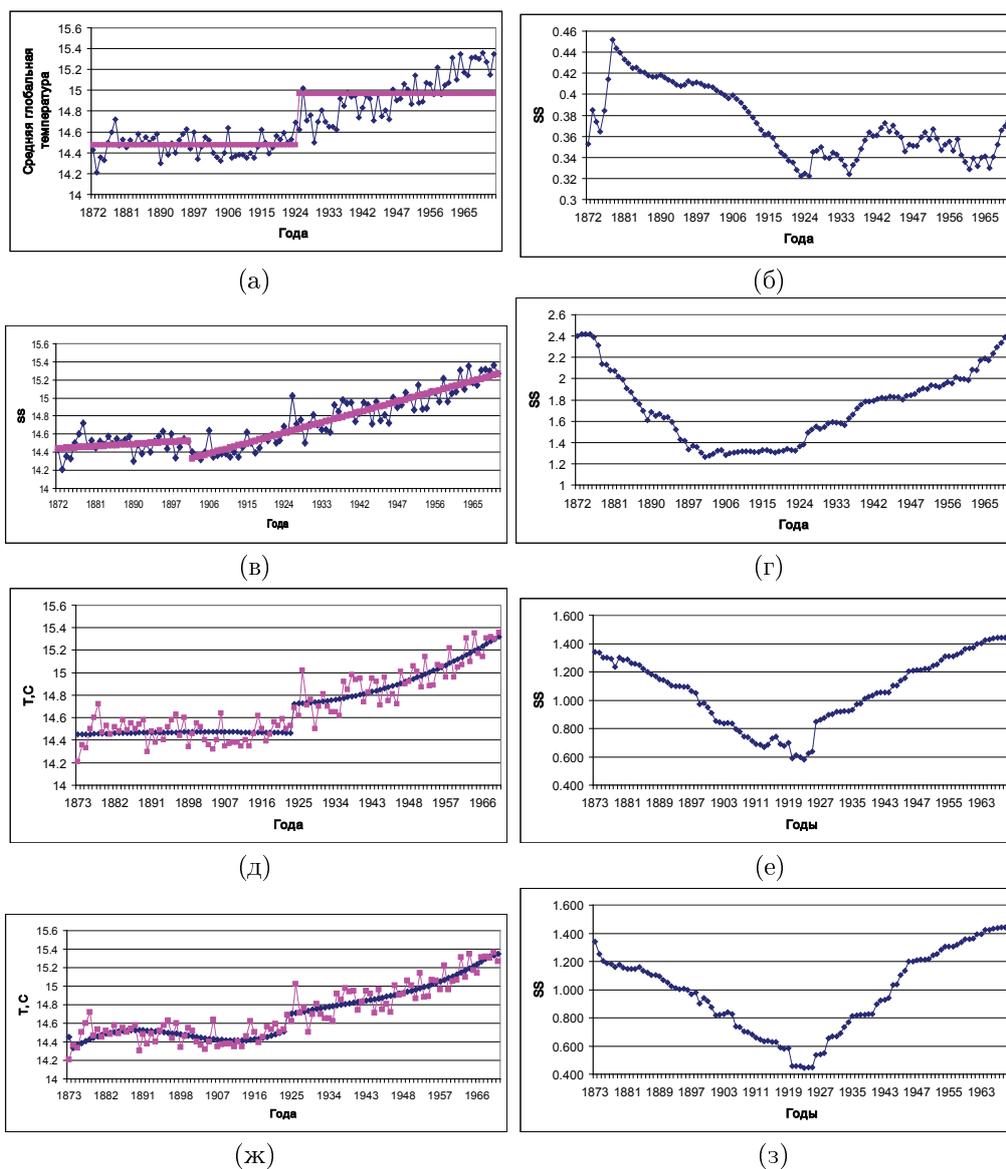


Рис. 4: Иллюстрация влияния порядка полиномов, аппроксимирующих отрезки временного ряда, на определение точки бифуркации (пояснения в тексте)

Преимущества использования полиномов порядка выше 1 иллюстрирует Рис. 5. Здесь нахождение положения точки бифуркации производится для весьма протяженного временного ряда, содержащего 2259 значений температуры воздуха, измеренных автоматической метеорологической станцией с дискретностью 15 мин. Временной ряд имеет весьма сложную структуру. Но это не помешало двум полиномам второй степени весьма успешно по предложенному алгоритму разделить

его на две части, найдя положение точки бифуркации как $n_1 = 879$.

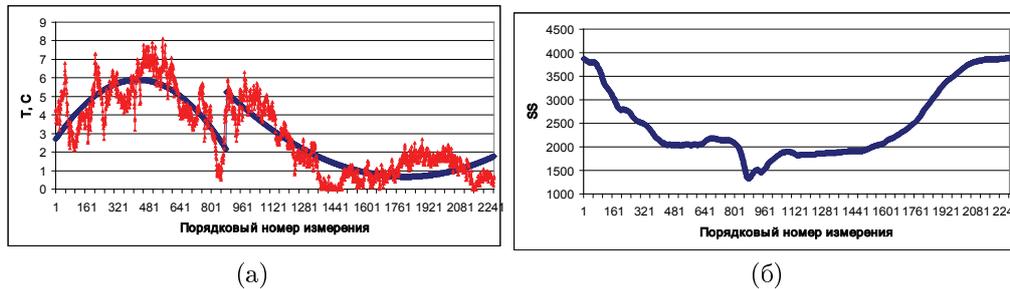


Рис. 5: Иллюстрация использования полиномов второй степени для определения положения точки бифуркации во временном ряду сложной конфигурации: (а) – временной ряд и два тренда, описываемые полиномами второго порядка; (б) – временная изменчивость параметра SS

4. Анализ устойчивости положения точки бифуркации к погрешностям в исходных данных

Метрика, значение которой используется при принятии решения о положении точки бифуркации, может не иметь однозначно выраженного экстремума. Так, на Рис. 6 (в) кривая значений SS характеризуется несколькими локальными минимумами: первый абсолютный минимум $SS = 2.735$ достигается при $n_1 = 67$, что соответствует 1935 году, второй локальный минимум $SS = 3.065$ наблюдается десятью годами ранее – $n_1 = 57$ (1925 год). Причем значения параметров SS отличаются всего на $\approx 5\%$, т.е. разрыв между оптимальным и квазиоптимальным значениями параметра SS минимален. Следовательно, можно предположить, что наличие погрешностей в исходных значениях временного ряда может приводить к различиям в параметрах SS , тем самым существенно сдвигая положения точек бифуркации. В связи с чем, представляется необходимым исследовать влияние ошибок в задании значений временного ряда на устойчивость найденной точки бифуркации, для чего была проведена серия численных экспериментов.

Будем предполагать, что в обрабатываемых данных отсутствует систематическая ошибка, а для случайных ошибок известно, что они имеют нормальный закон распределения с нулевым средним и известным среднеквадратическим отклонением (СКО): sk [13]. Имитацию погрешности в исходных данных выполним внесением значения dt , рассчитанного по формуле:

$$dt_i = \left\{ [2 \cdot \ln(1/\gamma_i)] \cdot \cos(2\pi \cdot \gamma_{i+1}) \cdot sk - \frac{sk}{2} \right\} \cdot 2, \quad (9)$$

где i – порядковый номер члена временного ряда: $i = 1, 2, \dots, N$, N – длина временного ряда; γ_i и γ_{i+1} – два последовательно вычисленных псевдослучайные числа, имеющие равномерное распределение на промежутке $[0,1]$ (при использовании языка программирования *Visual Basic*: $\gamma = Rnd$); sk – величина среднеквадратической ошибки измерения.

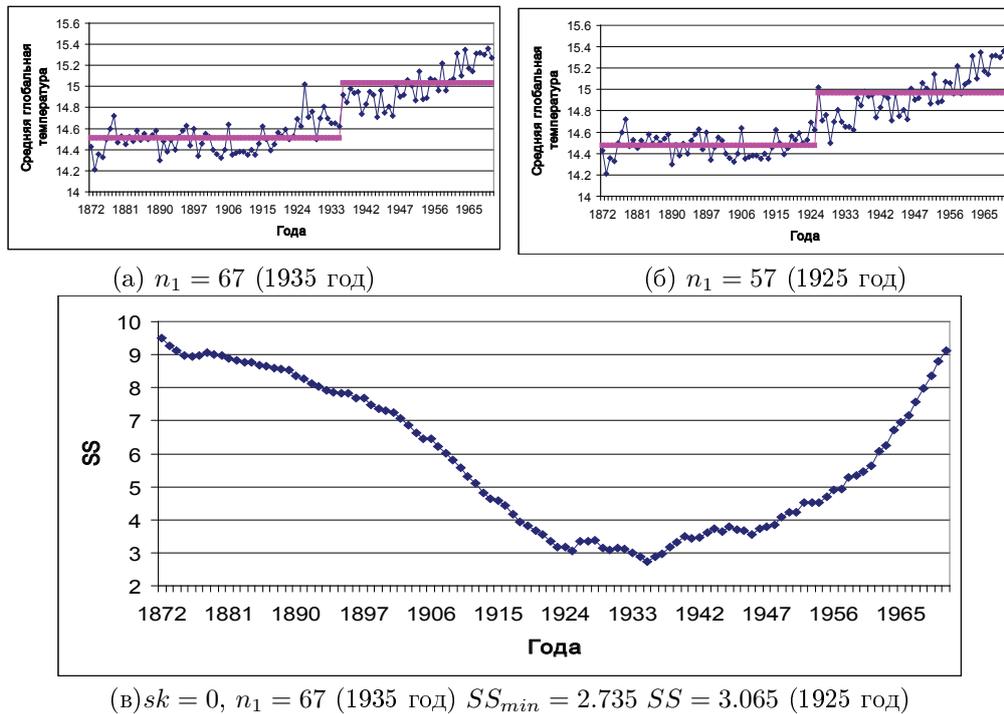


Рис. 6: Иллюстрация результатов определения оптимального (а) и квазиоптимального (б) положения точки бифуркации; (с) – временная изменчивость параметра SS (ф-ла (3))

Поскольку у нормального распределения имеются весьма протяженные «хвосты», то для исключения их влияния при моделировании случайной погрешности измерения использовались лишь те значения dt_i , которые по абсолютной величине не превосходили значения sk .

При проведении численных экспериментов в качестве исходного был взят уже ранее рассмотренный временной ряд средней глобальной температуры Земли на уровне 2 м с дискретностью 1 год.

Было выполнено по 50 реализаций случайного распределения ошибок определения средней глобальной температуры для каждого значения sk , которое менялось от $0,05$ °C до $0,20$ °C. На основе этих реализаций были созданы 50 временных рядов средней глобальной температуры, содержащих случайные погрешности определения температуры, и затем в каждом созданном временном ряду находилось положение точки бифуркации с использованием полиномов нулевой и первой степени.

В исходном временном ряду средней глобальной температуры (предполагаем, что он не содержит случайных погрешностей) точка бифуркации приходится на 1935 год – Рис. 7. Результаты изменчивости положения найденных точек бифуркации при использовании полинома нулевой степени представлены в виде гистограмм на Рис. 8. По вертикальной оси полученных гистограмм – число случаев,

когда в качестве порядкового номера точки бифуркации определялось значение, указанное на горизонтальной шкале.

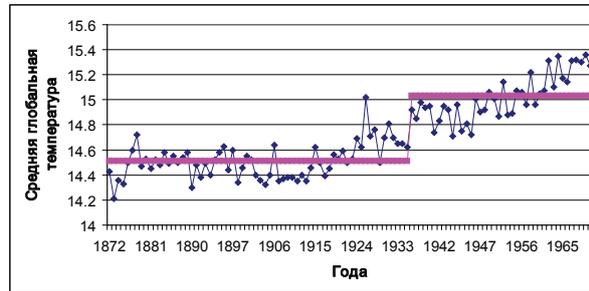


Рис. 7: Исходный временной ряд, $sk = 0; n_1 = 67$ (1935 год)

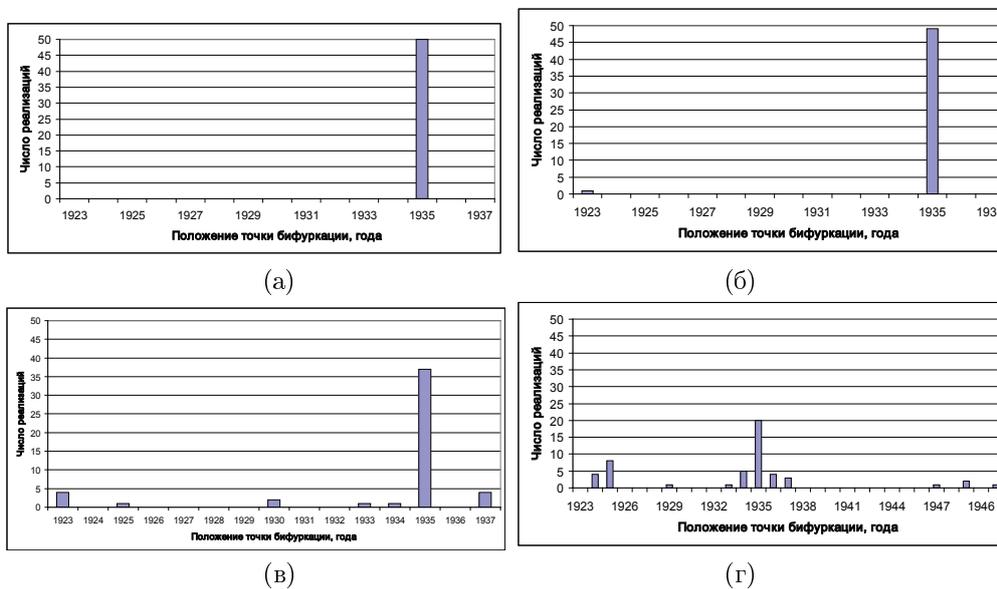


Рис. 8: Распределение положения точек бифуркации при различных значениях параметра sk :

- а) $sk = 0,05^{\circ}\text{C}$ (а), $n_1 = 67$ (1935 год) – 50 реализаций, $\Delta n = 0$ (1935 г);
 б) $sk = 0,1^{\circ}\text{C}$ (б), $n_1 = 67$ (1935 год) – 49 реализаций; $\Delta n = 55 \div 67$ (1923 ÷ 1935 гг);
 в) $sk = 0,15^{\circ}\text{C}$ (в), $n_1 = 67$ (1935 год) – 37 реализаций; $\Delta n = 55 \div 69$ (1923 ÷ 1937 гг);
 г) $sk = 0,2^{\circ}\text{C}$ (г), $n_1 = 67$ (1935 год) – 20 реализаций; $\Delta n = 56 \div 83$ (1924 ÷ 1947 гг).

Добавление погрешностей в исходный ряд кардинально не изменило статистическую оценку – в большинстве реализаций наблюдается такое же значение – 1935 г. Однако, чем больше уровень моделируемой погрешности, тем шире диапазон изменчивости положения точек бифуркации. При внесении небольшой погрешности 0,05 и 0,1 появились более ранние значения для точки бифуркации. Резкое

изменение в однозначности определения положения точки бифуркации начинается уже при $sk \geq 0.2$ °C: при $sk = 0.25$ °C разброс составляет 33 года (1921 ÷ 1954 гг), а при $sk = 1.00$ °C – 73 года (1892 ÷ 1965 гг).

Полученные данные можно интерпретировать следующим образом. При использовании данных, имеющих среднеквадратическую погрешность заданного уровня, можно получить любое положение точки бифуркации, из отмеченных на гистограмме, с вероятностью, обратной пропорциональной числу реализаций таких положений. Так, например, если точность задания временного распределения глобальной температуры составляет 0,2°С, только в 40% случаев будет определено действительное положение точки бифуркации (1935 г.), а в 60% случаев разброс составит от 1924 г. до 1947 г.

Полученные результаты наглядно свидетельствуют о важности оценки точности имеющихся данных для правильной интерпретации определенного по их значениям положения точки бифуркации.

Заключение

Изучение таких нелинейных явлений, как бифуркации, имеет большое прикладное значение, так как они соответствуют кризисным событиям в моделируемых системах. Предложенный в данной работе подход позволяет автоматизировать поиск положения точки бифуркации во временных рядах. В тоже время, приведенное исследование показывает те сложности, которые возникают при интерпретации казалось бы объективных результатов, связанных с определением положения точки бифуркации.

Рассмотренные алгоритмы носят универсальный характер и могут быть применены к исследованию временных рядов самого разнообразного характера.

Доказано, что повышение степени полинома способствует локализации экстремума в значениях метрики.

Исследована статистическая устойчивость предложенных алгоритмов к погрешностям в исходных данных. Она зависит от многих факторов: вид временного ряда, его длина, диапазон изменения параметров ряда и др. Но особую роль играет точность задания значений временного ряда. Так, для рассмотренного выше случая, когда диапазон изменения членов временного ряда составлял 1,2 °C, положение точки бифуркации достаточно надежно определяется при погрешности в данных, не превышающей 0,1°С.

Список литературы

- [1] Восканян К.Л., Дивинский Л.И., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Применение сплайн-экстраполяции для текущего прогнозирования приземной температуры воздуха // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2015. № 647. С. 88–92.
- [2] Кузнецов А.Д. Текущее прогнозирование на основе цифровой обработки изображений. СПб.: Изд-во РГГМИ, 1997. 167 с.

- [3] Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Автоматические метеорологические станции. Часть 2. Цифровая обработка данных автоматических метеорологических станций. Учебное пособие. Санкт-Петербург: РГГМУ, 2015. 80 с.
- [4] Алдошкина Е.С., Кузнецов А.Д., Пугачев А.А., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Чукин В.В. Опыт использования аппарата нейронных сетей для анализа и прогноза временного ряда температуры воздуха // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2009. № 11. С. 91–100.
- [5] Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 407 с.
- [6] Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. К вопросу о выделении аддитивных составляющих временного ряда приземной температуры воздуха // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2013. № 32. С. 55–65.
- [7] Экологический портал Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. URL: <http://www.infoeco.ru/index.php?id=53>.
- [8] Логинов В.Ф., Микушкина В.С. Изменение климата. Тренды, циклы, паузы. Минск: Беларуская навука, 2017. 179 с.
- [9] Ефременко Д.С., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Об одном алгоритме выявления локальных трендов при анализе метеорологических временных рядов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 45. С. 132–141.
- [10] Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Оценка возможностей метода аналогов для текущего прогноза температуры воздуха // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. № 1. С. 101–116. <https://doi.org/10.26456/vtprm528>
- [11] Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Текущее прогнозирование экологических измерений на основе поиска аналогов // Сборник тезисов XI научно-прикладной международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» (СПб., 16-18 октября 2018 г.).
- [12] Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Автоматические метеорологические станции. Часть 1. Тактико-технические характеристики: учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2016. 195 с.
- [13] Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. 246 с.

Образец цитирования

Кузнецов А.Д., Саенко А.Г., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Алгоритм поиска момента смены тренда во временных рядах метеорологических величин // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. № 3. С. 74–89. <https://doi.org/10.26456/vtprmk541>

Сведения об авторах

1. Кузнецов Анатолий Дмитриевич

заведующий кафедрой экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета.

Россия, 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98, РГГМУ.

E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

2. Саенко Андрей Геннадьевич

доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета.

Россия, 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98, РГГМУ.

E-mail: amkamc@mail.ru

3. Сероухова Ольга Станиславовна

доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета.

Россия, 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98, РГГМУ.

E-mail: serouhova@inbox.ru

4. Симакина Татьяна Евгеньевна

доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета.

Россия, 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98, РГГМУ.

E-mail: tatiana.simakina@gmail.com

ALGORITHM FOR FINDING THE MOMENT OF A TREND CHANGE IN THE TIME SERIES OF METEOROLOGICAL VARIABLES

Kuznetcov Anatolii Dmitriyevich

Head of the Department of Experimental Atmospheric Physics,
Russian State Hydrometeorological University
Russia, 195196, St. Petersburg, 98 Malookhtinsky ave, RSHU.
E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

Saenko Andrey Gennadyevich

Associate Professor at the Department of Experimental Atmospheric Physics,
Russian State Hydrometeorological University
Russia, 195196, St. Petersburg, 98 Malookhtinsky ave, RSHU.
E-mail: amkamc@mail.ru

Seroukhova Olga Stanislavovna

Associate Professor in the Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian
State Hydrometeorological University
Russia, 195196, St. Petersburg, 98 Malookhtinsky ave, RSHU.
E-mail: serouhova@inbox.ru

Simakina Tatiana Evgenyevna

Associate Professor in the Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian
State Hydrometeorological University
Russia, 195196, St. Petersburg, 98 Malookhtinsky ave, RSHU.
E-mail: tatiana.simakina@gmail.com

Received 12.08.2019, revised 18.09.2019.

An algorithm is proposed for finding the bifurcation point in a time series, and its implementation is performed over time series of air temperatures. The influence of the measurement error on the stability of finding the bifurcation point is simulated.

Keywords: time series of meteorological quantities, time series analysis, time trend, bifurcation point.

Citation

Kuznetcov A.D., Saenko A.G., Seroukhova O.S., Simakina T.Ye., “Algorithm for finding the moment of a trend change in the time series of meteorological variables”, *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya Matematika [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics]*, 2019, № 3, 74–89 (in Russian). <https://doi.org/10.26456/vtpmk541>

References

- [1] Voskanyan K.L., Divinskij L.I., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., Simakina T.E., “The use of spline extrapolation for the current prediction of surface air temperature”, *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2015, № 647, 88–92 (in Russian).
- [2] Kuznetsov A.D., *Tekushchee prognozirovanie na osnove tsifrovoj obrabotki izobrazhenij [Current forecasting based on digital image processing]*, RGGMI Publ., SPb., 1997 (in Russian), 167 pp.
- [3] Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., *Avtomaticheskie meteorologicheskie stantsii. Chast 2. Tsifrovaya obrabotka dannykh avtomaticheskikh meteorologicheskikh stantsij. Uchebnoe posobie [Automatic weather stations. Part 2. Digital data processing of automatic weather stations. Tutorial]*, RSHU, SPb., 2015 (in Russian), 80 pp.
- [4] Aldoshkina E.S., Kuznetsov A.D., Pugachev A.A., Seroukhova O.S., Simakina T.E., Chukin V.V., “Experience of using the neural network apparatus for analyzing and forecasting the air temperature time series”, *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2009, № 11, 91–100 (in Russian).
- [5] Malinin V.N., *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii [Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information]*, RSHU, SPb., 2008 (in Russian), 407 pp.
- [6] Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., Simakina T.E., “On the issue of the allocation of additive components of the time series of surface air temperature”, *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2013, № 32, 55–65 (in Russian).
- [7] *Ekologicheskij portal Sankt-Peterburga* (in Russian), <http://www.infoeco.ru/index.php?id=53>.
- [8] Loginov V.F., Mikushkina V.S., *Izmenenie klimata. Trendy, tsikly, pauzy [Changing of the climate. Trends, cycles, pauses]*, Belaruskaya Navuka Publ., Minsk, 2017 (in Russian), 179 pp.
- [9] Efremenko D.S., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., “An algorithm for identifying local trends in the analysis of meteorological time series”, *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2016, № 45, 132–141 (in Russian).
- [10] Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., Simakina T.E., “Assessment of the possibilities of the method of analogues for the current forecast of air temperature”, *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya Matematika [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics]*, 2019, № 1, 101–116 (in Russian), <https://doi.org/10.26456/vtpmk528>.
- [11] Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., Simakina T.E., “Current forecasting of environmental measurements based on the search for analogues”, *Abstracts of the XI Scientific and Applied International Conference “Natural and anthropogenic aerosols”* (St. Petersburg, October 16–18, 2018) (in Russian).

-
- [12] Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., *Avtomaticheskie meteorologicheskie stantsii. Chast 1. Taktiko-tekhnicheskie kharakteristiki: uchebnoe posobie [Automatic weather stations. Part 1. Performance characteristics: tutorial]*, RSHU, SPb., 2016 (in Russian), 195 pp.
- [13] Dyakonov V.P., *Spravochnik po algoritmam i programmam na yazyke bejsik dlya personalnykh EVM [Handbook for Computer Algorithms and Programs on Basic for Personal Computer]*, Nauka Publ., Moscow, 1987 (in Russian), 246 pp.