

*В.А. Лобанов, А.Е. Шадурский*

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭМПИРИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА  
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

*V.A. Lobanov, A.E. Shadursky*

**APPLICATION OF EMPIRIC-STATISTICAL METHODS  
FOR MODELING AND ANALYSIS OF CLIMATIC CHANGES**

*Рассмотрено применение методологии и методов эмпирико-статистического моделирования для анализа рядов климатических характеристик за разные интервалы времени от сотен тысяч до последних 1000 лет для палеореконструкций и для многолетних рядов инструментальных наблюдений на территории России. Показано, что результаты и выводы могут существенно варьировать в зависимости от применяемых методов и от методики получения климатических характеристик. Преимущество отдано модели ступенчатых изменений, причем эта модель статистически значима только в отдельных районах или для небольшого числа станций.*

*Ключевые слова: эмпирико-статистические методы, анализ временных рядов, палеореконструкции и наблюдения, изменение климата.*

*The application of the methodology and methods of empirical-statistical modeling is considered to analyze the series of climatic characteristics for different time intervals from hundreds of thousands of years to the last 1000 years for paleoreconstructions and time series of instrumental observations in the territory of Russia. It is shown that the results and conclusions can vary significantly depending on the methods used and the method of obtaining climatic characteristics. Preference is given to models of step changes, and this model is statistically significant only in certain areas or for a small number of stations.*

*Keywords: empirical and statistical methods, time series analysis, paleoreconstructions and observed data, climate change.*

**Состояние проблемы**

Современное состояние исследований в области изменения климата можно разделить на два основных направления: физико-математические модели климата, основанные на свойствах общей циркуляции атмосферы и эмпирико-статистическое направление, связанное с анализом и моделированием временных рядов и полей по данным наблюдений. Как первое, так и второе направление имеют свои преимущества и недостатки, но в то же время взаимно дополняют друг друга. История науки о климате идет от описания и установления закономерностей во времени и по пространству, от полученных взаимосвязей между разными метеорологическими характеристиками к последующему их теоретическому обобщению в виде физико-математических моделей. Вместе с тем дальнейшее развитие математических моделей невозможно без накопления новых знаний, полученных от эмпирики. В настоящее время физико-математические модели еще далеки до совершенства и поэтому новые закономерности

сти, полученные эмпирическим путем, определяют их дальнейший прогресс. В области эмпирического направления также необходимо дальнейшее развитие как в разработке новых эффективных методов анализа и обработки данных, так и в привлечении новой информации и данных последних лет наблюдений. Основная задача эмпирического направления – осуществлять мониторинг тех метеорологических факторов, которые приводят или могут привести к неблагоприятным и опасным природным явлениям. Современная статистика опасных природных явлений свидетельствует об их росте и все большем влиянии на жизнедеятельность отдельных стран и всей планеты. В задачу мониторинга должно входить адекватное описание временных рядов и полей без искажения их структуры с помощью выбранных моделей. Наглядным примером является применение гармонического анализа для моделирования временных рядов в гидрометеорологии, который не соответствует природе явления и “подгоняет” данные наблюдений под структуру модели.

Для эффективного стохастического моделирования гидрометеорологических процессов разработана общая методология, включающая последовательную обработку данных в трех основных измерениях: внутригодовая изменчивость, межгодовая изменчивость и пространственные обобщения. Предлагаемая методология построения такой общей динамической модели для описания пространственно-временных колебаний включает следующие основные шаги:

- обобщение информации на внутригодовом интервале времени в виде выборочных (экстремумы), обобщенных (среднемесячные, сезонные, среднегодовые) характеристик и параметров внутригодовой функции;
- разделение многолетних рядов на квазиоднородные составляющие с колебаниями разных временных масштабов и определение моделей временных рядов и их параметров для каждой квазиоднородной составляющей;
- формирование однородных районов с одинаковыми свойствами современных изменений климата на основе установленных закономерностей в индивидуальных временных рядах;
- построение пространственных моделей в однородных по климатическим изменениям районах в зависимости от установленных закономерностей;
- анализ и моделирование временных рядов параметров пространственных динамических моделей.

### **Методы исследований**

Для построения как общей динамической модели, так и отдельных ее частей, был разработан комплекс эффективных статистических методов, включающий метод разделения внутригодовой изменчивости на климатическую и синоптическую составляющие [Дрейпер, 1973, Lobanov, 2001], методы срезки и сглаживания амплитуд циклов для выделения процессов разных временных масштабов из многолетних рядов наблюдений климатических характеристик [Лобанов, 1988, Лобанов, 1992], методы классификации и построения простран-

ственных линейных моделей [Lobanov, 1999, Лобанов, 2005]. В связи, с тем, что в настоящей работе основной акцент будет сделан на результаты исследований и полученные закономерности многолетних колебаний климатических характеристик, более подробно рассмотрим две группы методов:

- методы идентификации класса стохастической модели,
- методы разделения композиционного циклического процесса на квазиоднородные составляющие.

Проявление изменений климата в многолетних временных рядах может быть двух основных видов:

- монотонные изменения в виде тренда,
- ступенчатые изменения, характеризующие переходы от одного стационарного состояния к другому.

Эти два вида климатических изменений отражают разные физические механизмы, действующие в климатической системе Земли. Трендовые изменения имеют место в слабо инерционной системе, которая быстро откликается на внешние воздействия. Механизм ступенчатых изменений или триггерный механизм характеризует неравновесную систему, которая может компенсировать внешние воздействия до тех пор, пока они не превышают порогового значения, после чего система быстро переходит на новый, часто квазистационарный, уровень. Стационарный временной ряд может быть частным случаем существования как равновесной, так и неравновесной систем. В первом случае это проявление случайных внешних воздействий, во втором – период стабильного состояния, пока величина внешнего воздействия не превысила критического порога. Кроме того, тип изменений может зависеть и от пространственного масштаба обобщения данных. Так, глобальная температура вполне может характеризоваться монотонным трендом, так как она отображает составляющую теплового баланса всей планеты. Климатические же изменения осадков для отдельной территории больше определяются сменой типов атмосферной циркуляции, что проявляется в виде ступенчатых переходов от одного стационарного состояния (типа циркуляции) к другому.

Для количественной оценки статистической значимости монотонных изменений использовались доверительные интервалы коэффициента корреляции уравнения линейного тренда:

$$Y_i = b_1 t_i + b_0, \quad (1)$$

где  $Y_i$  – многолетний ряд климатической характеристики;  $t_i$  – время в годах.

Для оценки статистической значимости ступенчатых изменений во временных рядах были применены известные статистические критерии: Стьюдента для оценки стационарности средних значений и Фишера для оценки стационарности дисперсий [Рекомендации, 1984]. При оценке стационарности временной ряд разбивается на две или несколько подвыборок одинаковой или разной дли-

ны, причем границы разбиения связывались с датами предполагаемого нарушения стационарности.

Наиболее распространенным методом для описания циклических колебаний является гармонический анализ [Бокс, 1974, Вентцель, 1991, Коняев, 1973], на основе которого модель временного ряда интерпретируется в виде суммы гармонических составляющих. Сумму гармоник можно представить в виде регрессионного уравнения, например:

$$Y_i = B_1 \sin\left(\frac{t_i}{T_1}\right) + B_2 \sin\left(\frac{t_i}{T_2}\right) + \dots + B_0, \quad (2)$$

где  $Y_i$  – рассматриваемая климатическая характеристика;  $t_i$  – годы;  $T_1, T_2, \dots$  – периоды циклов;  $B_1, B_2, \dots, B_0$  – коэффициенты, определяемые по МНК и связанные с амплитудой гармоник и их фазой.

Для того чтобы оценить вклад каких периодов в общую дисперсию колебаний является наибольшим, можно рассчитать функцию спектральной плотности [Гренджер, 1972]. Но с другой стороны, в уравнении (2) сочетания периодов с разными, даже не наибольшими вкладами, могут дать больший эффект при описании суммарного процесса [Дрейпер, 1973]. Очевидно, что при этом каждый из коэффициентов уравнения должен быть статистически значимым.

Вторым подходом к декомпозиции сложного процесса и выделению составляющих разных временных масштабов являются статистические методы сглаживания и фильтрации. Эти методы стараются обойти основные ограничения гармонического анализа на вид функции циклов и постоянство их периодов и амплитуд во времени. Самый простой способ выделения составляющих разных временных масштабов состоит в последовательном осреднении по времени, которое сглаживает процесс (или процессы) с периодами меньшими заданного интервала осреднения. Два других статистических метода, которые были разработаны для этой цели – это метод срезки [Лобанов, 1988, Лобанов, 1992] и метод сглаживания амплитуд циклов [Lobanov, 2001]. Методы основаны не на задаваемой аналитической модели временного ряда, а на самых общих представлениях о его структуре. К таким общим представлениям можно отнести следующие:

– временной ряд неоднороден и является композицией (или суперпозицией) процессов разных временных масштабов, что можно представить в виде уравнения с тремя основными компонентами за инструментальный период [CLIVAR, 1995]:

$$Y_{com} = Y_{interan} + Y_{decade} + Y_{centure} + \dots + B_0, \quad (3)$$

где  $Y_{com}$  – рассматриваемая характеристика годовой дискретности;  $Y_{interan}$  – составляющая межгодового временного масштаба,  $Y_{decade}$  – составляющая десятилетнего временного масштаба;  $Y_{centure}$  – составляющая столетнего временного масштаба;  $B_0$  – составляющие остальных временных масштабов (продолжительнее наибольшего из рассматриваемых, например, тысячелетнего, сотни ты-

сяч лет и т.п.), которые представляются на исследуемом интервале времени в виде постоянной величины;

- основные характеристики циклов, такие как периоды и амплитуды, для процесса каждого временного масштаба не являются постоянными во времени;

- анализировать необходимо только те флуктуации, которые существенно превышают погрешность данных.

При этом предельная погрешность ( $\epsilon_{\max}$ ) может быть задана кратной точности измерений или установлена итерационным путем, если количество однородных составляющих задано априори, например, равное 3 для 100–200-летнего ряда наблюдений.

Метод срезки основан на последовательном вычитании из общего ряда данных наблюдений ( $Y_{com}$ ) процессов разных временных масштабов, начиная с наименьшего – межгодового. Алгоритм метода “срезки” состоит в следующем:

- задается начальное значение предельной погрешности и количество процессов разных временных масштабов;

- в многолетнем ряду вначале выделяются все экстремумы, а затем исключаются те, последовательные разности между которыми (амплитуды циклов) меньше  $\epsilon_{\max}$ ;

- минимумы выделенных значимых циклов соединяются прямыми линиями и на основе линейной интерполяции определяются значения  $Y_{jpac}$  для каждого года;

- принимается, что в точках минимумов процесс наименьшего масштаба отсутствует, поэтому из ряда наблюдений вычитается кусочно-линейная составляющая, соединяющая минимумы циклов и полученная разность  $Y_{inter\ j} = Y_j - Y_{jpac}$  характеризует процесс наименьшего масштаба – межгодовых колебаний;

- процедуру поиска значимых экстремумов повторяют для остатка ( $Y_{jpac}$ ) и в результате “срезают” процесс следующего временного масштаба – десятилетнего ( $Y_{dec\ j}$ );

- если остаток далее невозможно разделить на составляющие, то он представляет собой процесс вековых изменений ( $Y_{cent\ j}$ ), если же можно срезать и вековые колебания, то предельная погрешность ( $\epsilon_{\max}$ ) увеличивается на небольшой градиент и процедура повторяется до тех пор, пока в результате “срезки” не будут получены процессы трех временных масштабов.

Алгоритм метод сглаживания амплитуд циклов аналогичен алгоритму метода срезки, но в этом методе вместо соединения точек минимумов значимых циклов соединяются точки середин ветвей подъема и спада циклов, т.е. происходит сглаживание амплитуд пульсаций.

Модельные примеры и практика применения показали, что метод “срезки” позволяет эффективно определять характеристики циклов высокочастотных составляющих, а метод сглаживания амплитуд циклов – форму низкочастотной составляющей.

**Результаты анализа и полученные закономерности**

Применение предлагаемой методологии и методов показано для рядов различных гидрометеорологических характеристик как в разных районах России и мира, так и для разных временных интервалов: от интервала инструментальных наблюдений в 100–300 лет до интервалов времени в сотни тысяч лет для палеоклиматических данных.

**1. Анализ 800-тысячелетней палеорекострукции**

Рассмотрены результаты Европейского Проекта Ледяных Кернов Антарктиды (EPICA), содержащие информацию об изменении климата за последние 800000 лет, полученную по керну льда с глубины до 3259,7 м. На рис. 1 приведен ряд температуры воздуха, восстановленной по дейтерию в отклонениях от средней температуры за последние 1000 лет [OMACVP, 2007]. Основная особенность данных состоит в их разной дискретности, которая варьирует от нескольких десятков лет в последний период до 1 измерения в тысячу лет для раннего периода времени. Свойство разной дискретности, как следует из рис. 1, особенно существенно влияет на амплитуду 100-тысячелетних циклов, которая из-за этого является неоднородной. По условиям квазиоднородной дискретности весь временной ряд палеорекострукции был разбит на 5 квазиоднородных интервалов: 600–800 тыс. лет назад со средней дискретностью ( $dt$ ) 1 измерения в 700 лет ( $1/700$ ), интервал 430–600 тыс. лет с  $dt = 1/500$ , интервал 350–430 тыс. лет с  $dt = 1/300$ , интервал 130–350 тыс. лет с  $dt = 1/150$  и последний современный интервал с  $dt = 1/50$ . Вычисленная за последний интервал времени скорость изменения температуры воздуха за 10 лет достигала по модулю 0,3–0,4 °C или 3–4 °C за столетие. Поэтому основной вывод состоит в том, что в последние 150 тыс. лет имели место скорости изменения температуры воздуха соизмеримые со скоростью современного потепления и даже превышающие ее.

Применение методов декомпозиции также позволило получить количественную информацию о числе составляющих и характеристиках циклов. На интервале 800 тыс. лет были выделены процессы четырех масштабов: столетнего со средним периодом  $T_{cp} = 313$  лет и средней амплитудой  $A_{cp} = 1,7$  °C (за последние 150 тыс. лет), тысячелетнего с  $T_{cp} = 4400$  лет (при вариации от 2300 до 8800 лет за разные интервалы дискретности) и  $A_{cp} = 2,0$  °C, десяти тысячелетнего с  $T_{cp} = 27\,500$  лет (при вариации от 23\,300 до 48\,000) и  $A_{cp} = 3,2$  °C и столет тысячелетнего масштаба с  $A_{cp} = 10$  °C (за последние 430 тыс. лет). Наибольшие амплитуды циклов составляют 3,0–3,5 °C для процесса столетнего масштаба и 4–5 °C для процессов остальных масштабов. Поэтому при наложении процессов разных временных масштабов изменения температуры в несколько градусов за столетие являются вполне характерными за почти миллионную историю климата.

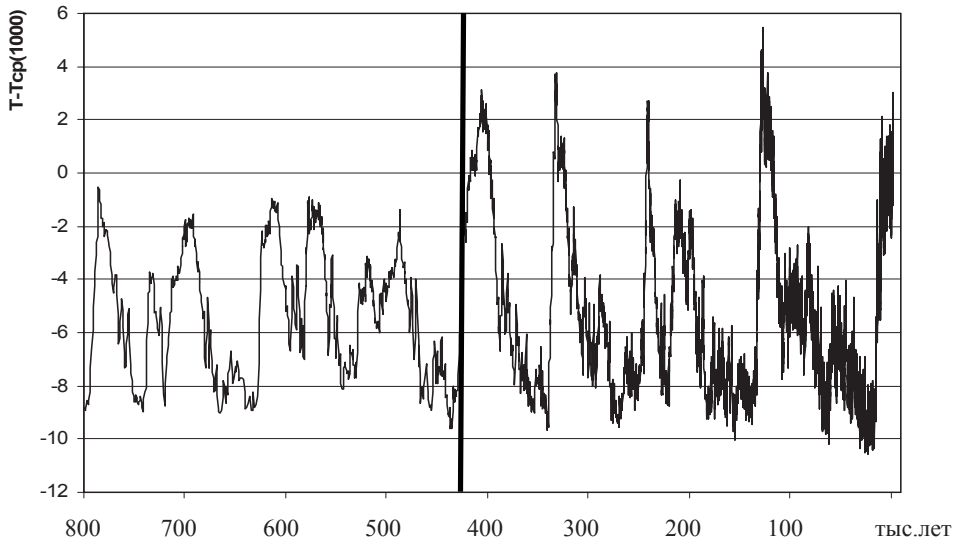


Рис. 1. “Изотопная” температура воздуха, восстановленная за период 801662 года

## 2. Анализ температуры за последние 45 тыс. лет

Хронологический график палеорекострукции температуры, полученный также в рамках проекта EPICA, приведен на рис. 2. Рассматриваемый интервал времени включает два квазиоднородных периода, как по дискретности данных, так и по температурному режиму. Первый интервал от 17 до 45 тыс. лет имеет среднюю дискретность 1 измерение в 45 лет и включает окончание последнего ледникового периода. Далее следует переход к голоцену, который начался примерно 12 тыс. лет назад и здесь дискретность наблюдений составляет уже 1 измерение в 10–20 лет.

Для каждого квазиоднородного периода осуществлена декомпозиция ряда двумя методами (срезки и сглаживанием амплитуд циклов) и выделены процессы столетнего и тысячелетнего масштабов. Для процесса тысячелетнего масштаба и для периода позднеледникового  $T_{cp} = 1330$  лет и  $A_{cp} = 0,9$  °С, для периода голоцена  $T_{cp} = 1010$  лет и  $A_{cp} = 1,3$  °С. Для процесса столетнего масштаба в позднеледниковье  $T_{cp} = 203$  лет и  $A_{cp} = 1,0$  °С, а в современный период  $T_{cp} = 96$  лет и  $A_{cp} = 1,5$  °С. Из-за большей частоты измерений данные последнего периода более надежны, особенно при определении амплитуд циклов. Поэтому можно сделать, что полученные различия параметров циклов позднеледникового и голоцена обусловлены разной дискретностью данных, а амплитуды циклов процессов столетнего и тысячелетнего масштабов практически одинаковы и их наложение приводит к изменению температуры 2–3 °С за столетие.

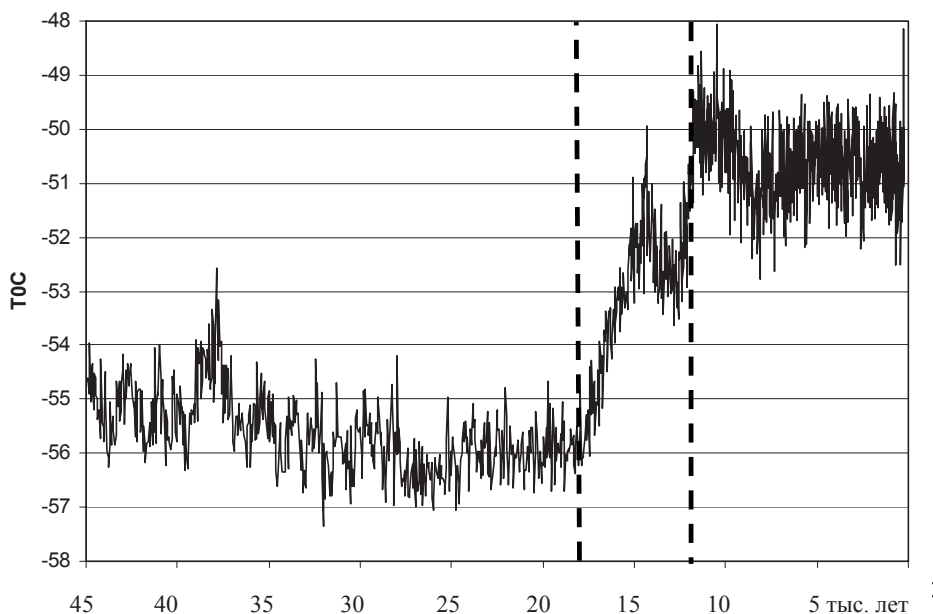


Рис. 2. Реконструкция температуры воздуха (Антарктика) за последние 45 000 лет

### **3. Изменение глобальной температуры за последние 1000–1300 лет**

Рассматривались ежегодные данные 6 различных палеореконструкций аномалий температуры Северного полушария (от нормы 1961–1990 гг.), полученные разными авторами (Jones, 1998; Mann et al., 1999; Briffa, 2000; Crowley & Lowery, 2000, etc), по материковым индикаторам (керны, дендроинформация и т.д.) для диапазона широт 20–90 ° [CLNHTRS, 2000, Esper, 2002]. Прежде всего, была проведена оценка связанности разных палеореконструкций и получено, что коэффициенты парной корреляции невысоки и варьируют от  $R = 0,35$  до  $R = 0,69$ . Кроме того, палеореконструкции недостаточно тесно связаны с температурой воздуха Северного полушария, вычисленной по стационарным наблюдениям за последний 150-летний период:  $R = 0,52–0,57$  для дендрореконструкций. Поэтому все сравнения можно проводить только на уровне обобщенных показателей временных рядов.

В результате выполненной декомпозиции выявлены процессы трех временных масштабов: межгодового, десятилетнего и столетнего, а также части двух циклов процесса тысячелетнего масштаба. В процессе обобщения информации по характеристикам циклов установлено, что 4 палеореконструкции дают близкие результаты, а две (Jones и Crowley & Lowery) существенно отличаются от остальных, причем в разные стороны от общих средних показателей. По четырем палеореконструкциями получены следующие средние периоды и амплиту-



ды:  $T_{cp} = 4$  года и  $A_{cp} = 0,16-0,26$  °C для процесса межгодовой климатической изменчивости,  $T_{cp} = 24-28$  лет и  $A_{cp} = 0,15-0,27$  °C для процесса десятилетней изменчивости и  $T_{cp} = 140-190$  лет и  $A_{cp} = 0,20-0,21$  °C для процесса столетнего масштаба. При этом наибольшие амплитуды циклов составили  $0,4-0,5$  °C для процесса межгодового масштаба,  $0,3-0,4$  °C для десятилетнего и  $0,2-0,3$  °C для процесса столетнего масштаба, что подтверждает известную закономерность увеличения амплитуды колебаний при переходе от низкочастотной области спектра к высокочастотной. Изменение периодов и амплитуд циклов во времени для процессов межгодовой и десятилетней климатической изменчивости имело практически случайный характер, как следует, например, из рис. 3, на котором приведен хронологический ряд амплитуд циклов процесса межгодовой изменчивости.

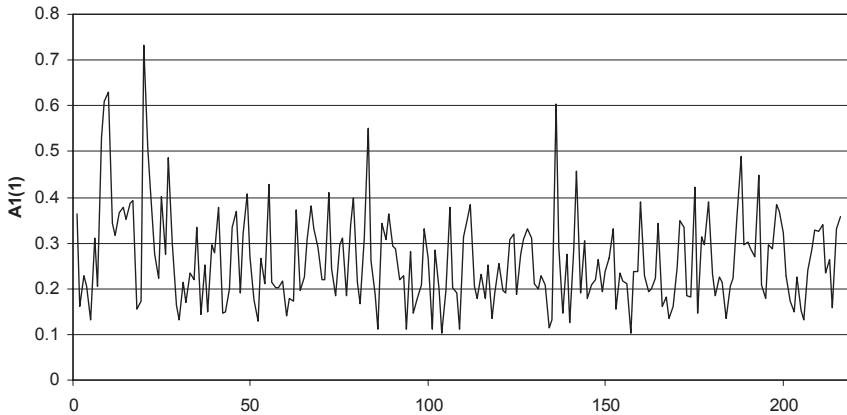


Рис. 3. Хронологический ряд амплитуд циклов процесса межгодового масштаба

#### ***4. Наиболее продолжительные ряды инструментальных наблюдений***

Начало инструментальных наблюдений связано с изобретением первых метеорологических приборов: термометра (1610 г.), барометра, дождемера. Первое зарегистрированное метеорологическое наблюдение относится к 1607 г., однако регулярные наблюдения на отдельных станциях начались с конца XVII – начала XVIII вв.: с 1697 г. – Кью Гарденс (Великобритания), с 1706 г. – Билт (Нидерланды), с 1744 г. – Санкт-Петербург (Россия), с 1753 г. – Женева (Швейцария), с 1757 г. – Париж (Франция). Несмотря на то, что за столь продолжительный период изменялась методика наблюдений и сами приборы, на основе анализа наиболее продолжительных рядов наблюдений можно сделать вывод, что современные максимумы температуры не являются аномалиями, а аналогичные имели место и в прошлом. В качестве примера на рис. 4 показано как современное повышение температуры, так и предыдущее в начале – середине XIX в.

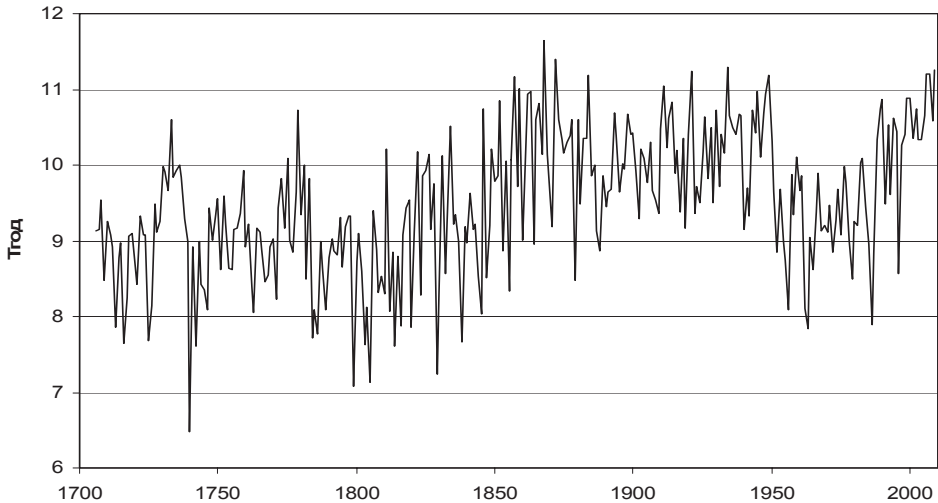


Рис. 4. Среднегодовая температура воздуха на станции Билт (Нидерланды)

Помимо того, что при оценке “аномальности” современных экстремумов необходимо использовать предыдущие данные, вторая основная особенность в получаемых выводах определяется применяемыми методами обработки или “инструментами” (tools). На примере продолжительного ряда средних температур воздуха января в Санкт-Петербурге (1744–2009 гг.) рассмотрим результаты применения различных методов моделирования временного ряда, включая: стационарное среднее, линейный тренд, спектральный анализ, методы декомпозиции и выделения циркуляционных эпох. На рис. 5 приведена аппроксимация временного ряда моделью линейного тренда с коэффициентом корреляции  $R = 0,32$ , который является статистически значимым при объеме выборки в 254 года и средней скорости роста температуры  $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 100 лет. Вместе с тем отношение дисперсии многолетних колебаний к остаточной дисперсии относительно линейного тренда равное 1,12 не является статистически значимым и свидетельствует о том, что модель тренда статистически не отличается от модели случайной выборки, а в терминах стандартного отклонения модель тренда уменьшает естественную вариацию только на 5 %.

Следующая модель представляет собой аппроксимацию временного ряда суммой гармоник с разными периодами, предварительный отбор которых был осуществлен на основе автокорреляционной функции и включал 31 гармонику с периодами в диапазоне от 2 до 120 лет. В результате получено уравнение, включающее только 5 статистически значимых гармоник с периодами 24, 27, 28, 29 и 30 лет:

$$T_i = 0,25\sin(2\pi i/24) + 0,63\sin(2\pi i/27) - 1,02\sin(2\pi i/28) + 0,84\sin(2\pi i/29) - 0,48\sin(2\pi i/30) \text{ с } R = 0,37. \quad (4)$$

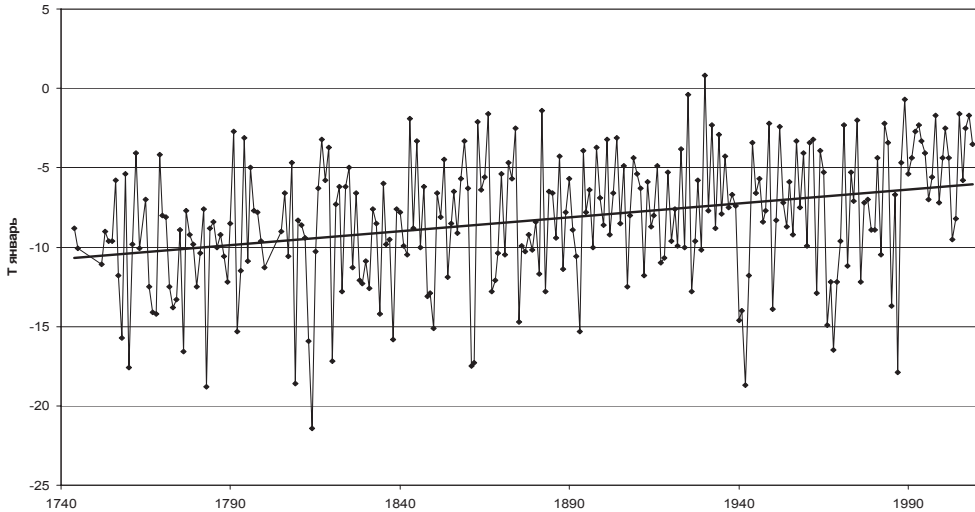


Рис. 5. Ряд среднемесячных температур воздуха января и его аппроксимация трендом (г. Санкт-Петербург)

Коэффициент множественной корреляции уравнения (4)  $R = 0,37$  ненамного отличается от  $R = 0,32$  в модели линейного тренда, а сама модель гармоник статистически значимо не отличается от модели случайной выборки.

Применение двух методов декомпозиции дало одинаковые результаты: выделены процессы трех временных масштабов: межгодового, десятилетнего и столетнего. Причем средний период циклов процесса межгодовой изменчивости составлял 4 года при вариации от 2 до 11 лет, а средний период процесса десятилетнего масштаба составлял 28 лет при вариации от 13 до 53 лет, т.е. спектральные диапазоны процессов двух соседних масштабов не перекрываются. Каких-либо закономерностей во временных рядах периодов и амплитуд циклов процессов этих масштабов не установлено. Единственно, что наблюдается практически “ступенчатый” переход в росте температуры в 1820–1830-х годах для процесса столетнего масштаба. Если сравнить среднюю многолетнюю температуру с начала наблюдений по 1828 г. и за второй интервал времени по 2009 г., то эти средние будут иметь статистически значимое различие по критерию Стьюдента даже при уровне значимости  $\alpha = 1\%$ . Установленная неоднородность ряда наблюдений, видимо связана с переносом станции, так как с 1835 г. наблюдения проводились в горном институте на Васильевском острове.

Если рассматривать изменение температуры воздуха с учетом эпох атмосферной циркуляции, то некоторые соседние интервалы времени будут иметь статистически значимые отличия в средних и дисперсиях, а другие нет. Так, например, период 1940–1987 гг. имеет большую дисперсию и меньшую среднюю температуру, чем последующий период 1988–2009 гг., что установлено по

критериям Фишера и Стьюдента при  $\alpha = 1\%$ . В тоже время, предыдущий период 1920–1939 гг., хотя также и является более теплым, но по параметрам статистически не отличается от периода 1940–1987 гг.

Поэтому циркуляционные эпохи отображают цикличность процесса десятилетнего масштаба, разница состоит лишь в том, что при переходе от одних температурных условий к другим принимается или монотонность (циклы) или ступенчатость изменений (эпохи атмосферной циркуляции). Если в этом же многолетнем ряду отдельно рассматривать наибольшие экстремумы циклов, сформированные теплыми воздушными массами. И наименьшие, сформированные приходом холодных воздушных масс, то единственная неоднородность будет иметь место также в 1830-х годах, после чего ряды наибольших и наименьших экстремумов циклов становятся стационарными. Также можно отметить, что подобная неоднородность обусловила вероятно и значимость линейного тренда повышения температуры, наравне с последним периодом (1988–2009 гг.) относительно высоких температур при средней значении  $-4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  января. Вместе с тем, средняя температура января в 2010 г. составила  $-12,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует или о завершении периода теплых температур января или, по крайней мере, статистическая значимость последнего теплого периода как аномального существенно уменьшится. Также, если найти температурный тренд за период 1935–2010 гг., то его коэффициент корреляции  $R = 0,21$ , т.е. будет уже в 1,5 раза меньше.

### ***5. Изменение температуры воздуха и осадков на территории России***

Рост глобальной приземной температуры воздуха на последнее столетие практически ни у кого не вызывает сомнения, особенно за период 1980–2000 гг., хотя много вопросов вызывает физический смысл этой величины и методика ее определения. Применение методов декомпозиции позволило установить стационарность периодов и амплитуд циклов процесса межгодовой изменчивости, а также циклические закономерности в колебаниях амплитуд циклов процесса десятилетней климатической изменчивости на фоне ветви подъема процесса столетнего масштаба, начиная с 1920-х годов. В то же время, много больший интерес, чем глобальная температура, представляет проблема изменения климатических характеристик на территории России. В работе [Анисимов, 2007] показано, что из 22 выделенных однородных районов модель ступенчатых изменений средней районной температуры имеет преимущество над моделью тренда в 15 районах, а в остальных эти модели практически не различаются по величине остаточной дисперсии. Вместе с тем, статистическая значимость модели ступенчатых изменений по отношению к модели стационарной выборки имеет место только для трех районов центральной и южной части Восточной Сибири. Аналогичная территория Забайкалья с наибольшим ростом температур для России и всего мира в  $1,65\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 100 лет установлена в исследованиях ГГО. При этом градиент роста глобальной температуры составляет  $0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 100 лет и

поэтому можно считать, что территория центра и юга Восточной Сибири вносит основной вклад в глобальное потепление.

Чтобы разобраться в феномене стремительного потепления рассматриваемого региона, были выбраны 10 наиболее продолжительных рядов наблюдений за среднемесячной температурой воздуха по 2009 г. включительно из базы данных Королевского метеорологического института Нидерландов (The Royal Netherlands Meteorological Institute) [KNMI, 2009], которые используются при определении глобальной температуры. Выбраны следующие метеостанции (при расположении в регионе с запада на восток и с севера на юг): Ербогачен, Киренск, Витим, Сунтар, Вилюйск, Якутск, Алдан, Оймякон, Усть-Майя, Аян. В связи с тем, что методика определения среднегодовой температуры из среднемесячных данных может быть разная, то рассматривались два варианта: определение среднегодовой температуры, если среднемесячные данные имели место не менее, чем за 9 месяцев года (пропуски наблюдений  $\leq 3$  месяца в году) и во втором варианте среднегодовая температура рассчитывалась, если данные были за все 12 месяцев. В многолетних рядах, полученных по первому варианту, имели существенные повышения температуры до 2–3 °С за последние 25 лет, особенно в Якутске, Оймяконе, Усть-Майя, Вилюйске, Витиме. Однако этот резкий подъем обусловлен аномально высокой среднегодовой температурой 2007 г., которая получена по данным 11 месяцев, так как среднемесячная температура декабря на всех станциях отсутствовала. Если же рассматривать временные ряды в которых среднегодовая температура получена по всем 12 месяцам, то ситуация существенно изменится. Во-первых имеет место только ступенчатый рост температуры с середины – конца 1980-х годов не для всех станций, а во-вторых, эта “ступенька” достигает 1,6–1,7 °С только в Якутске и Алдане, а на остальных станциях существенно меньше. Пример разных результатов, получаемых при разных методиках подсчета среднегодовой температуры, показан на графиках рис. 6 для Якутска.

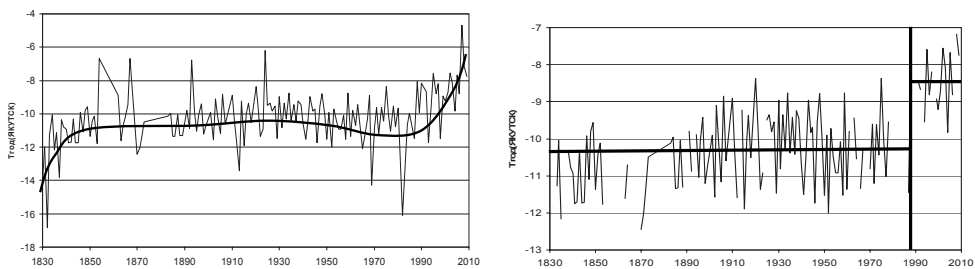


Рис. 6. Среднегодовые температуры воздуха в г. Якутске, полученные по двум вариантам

Если же принять версию, что в рассматриваемом регионе среднегодовая температура выросла ступенчато где-то 20–25 лет назад, то это может быть связано с изменением атмосферной циркуляции.

Проверка эффективности конкурирующих моделей временных рядов (стационарное среднее, линейный тренд и ступенчатые изменения) была осуществлена также для многолетних рядов температуры воздуха и осадков в отдельных регионах России. Практически во всех случаях преимущество имела модель ступенчатых изменений. Вместе с тем, статистическая эффективность этой модели по сравнению с моделью стационарного среднего имела место для небольшого числа случаев: 17 % – для рядов осадков и 4,7% для температуры воздуха на территории севера Западной Сибири; 11 % – для рядов осадков и 6,8 % для температуры воздуха на территории Северо-Запада ЕТР и всего 4,2 % – для рядов осадков и 3,1 % для температуры воздуха на территории Калининградской области. Причем, большая нестационарность в рядах осадков обусловлена сменой регистрирующих приборов в 1950–60-х годах.

### Выводы

Предварительный анализ различных по продолжительности временных рядов реконструированных и наблюдаемых климатических характеристик позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Почти за 1 миллион лет истории Земли имели место колебания осредненной за период в несколько сот лет температуры воздуха с амплитудой 10–15 °С за 100 тыс. лет, при этом скорость изменений часто достигала 3–4 °С за столетие, что даже превышает современное потепление;

2. По палеоданным за голоцен в последние 12 тысяч лет уже можно более надежно получить численные значения периодов и амплитуд циклов процессов разных временных масштабов. Так для процесса тысячелетнего масштаба  $T_{cp} = 1010$  лет и  $A_{cp} = 1,3$  °С, а для процесса столетнего масштаба  $T_{cp} = 96$  лет и  $A_{cp} = 1,5$  °С, что при наложении процессов приводит к изменению температуры в 2–3 °С за столетие;

3. Ежегодные реконструкции глобальной температуры за последние 1000–1300 лет позволяют определить  $T_{cp} = 4$  года и  $A_{cp} = 0,16–0,26$  °С для процесса межгодовой климатической изменчивости,  $T_{cp} = 24–28$  лет и  $A_{cp} = 0,15–0,27$  °С для процесса десятилетней изменчивости и  $T_{cp} = 140–190$  лет и  $A_{cp} = 0,20–0,21$  °С для процесса столетнего масштаба. При наложении процессов это приводит к изменению в 0,5–0,6 °С за столетие, что имеет место и для современной глобальной температуры. При этом эпохи высокой температуры наблюдались 10–12 вв., а низкой – в 16–18 вв. и перепады глобальной температуры между этими эпохами достигали 1,0 °С.

4. В наиболее продолжительных рядах инструментальных наблюдений за последние 250–300 лет ранее также были зафиксированы экстремальные температуры, которые или еще не были превышены современным потеплением или ненамного ниже современных.

5. На примере наиболее продолжительного ряда среднемесячных температур воздуха января в г. Санкт-Петербурге за период 254 года наблюдений пока-

зана зависимость получаемых выводов от применяемых статистических методов и результаты варьируют от случайной выборки до линейного тренда. Наиболее эффективные методы позволили установить неоднородность всего ряда наблюдений и начало однородного периода с 1835 г., а также значения средних периодов межгодовой и десятилетней климатической изменчивости в 4 года и 28 лет соответственно.

6. При анализе изменений региональной температуры воздуха на территории России приоритет отдан модели ступенчатых изменений многолетних колебаний по сравнению с моделями стационарного среднего и тренда, что характеризует эпохальные и резкие изменения в атмосферной циркуляции. При этом статистическая значимость ступенчатых изменений имеет место только для территории центра и юга Восточной Сибири. Здесь же установлена зависимость выводов от методики получения среднегодовой температуры: с учетом пропусков наблюдений или без них.

7. Предварительные исследования многолетних рядов температур воздуха и осадков на станциях в отдельных районах России оказали, что хотя модель ступенчатых изменений имеет преимущество, но статистическая значимость ее всего от 7 до 17 % от общего числа анализируемых рядов.

### Литература

1. Анисимов О.А., Лобанов В.А., Ренева С.А. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века // Метеорология и гидрология, 2007, № 10, с. 20-30.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 379 с.
4. Гренджер К., Хатанака М. Спектральный анализ временных рядов в экономике. – М.: Статистика, 1972. – 312 с.
5. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
6. Коняев К.В. Спектральный анализ случайных процессов и полей. – М.: Наука, 1973. – 168 с.
7. Лобанов, В.А., Анисимов, О.А. Современные изменения температуры воздуха на территории Европы // Метеорология и гидрология, 2003, № 2, 5–14.
8. Лобанов В.А., Степаненко С.Р. Эмпирические методы фильтрации и разделения природных процессов на разномасштабные составляющие // Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Перспективные методы планирования эксперимента", Гродно, 1988.
9. Лобанов В.А., Смирнов И.А. Декомпозиция метеорологических процессов и анализ их характеристик эмпирическими методами // Межвуз. сб. "Вопросы прогноза погоды, климата и циркуляции атмосферы". – Пермь, 1992, с. 101-108.
10. Лобанов В.А., Анисимов О.А. Эмпирико-статистическое моделирование временных и пространственных изменений гидрометеорологических характеристик // Труды ИНЭНКО, отд. "Наука", 2005, с. 78-81.
11. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 78 с.
12. CLIVAR. A study of climate variability and predictability. – Science Plan, WMO/TD No 690, 1995. – 157 pp.
13. Crowley and Lowery Northern Hemisphere Temperature Reconstruction Science. Vol. 289, p. 270, 14 July 2000.

14. *Esper J., Cook E.R., Schweingruber F.H.* Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability, *Science*, Volume 295, Number 5563, 22 March 2002.
15. *Lobanov V.A.* Empirical-statistic methodology and methods for modelling and forecasting of climate variability of different temporal scales. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, vol. 18, Science Press, Beijing, China, pp. 844-863.
16. *Lobanov V.A., Lobanova H.V.* Trends in Cold Climate Characteristics in "Urban Drainage in specific climates". *Cold climate*. UNESCO, 1999, 35 pp.
17. *Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years*. *Science*, Vol. 317, No. 5839, pp. 793-797, 10 August 2007.
18. The Royal Netherlands Meteorological Institute. *Climate Explorer*. Select a monthly time series. Historical observations – Netherlands. 2009. см. <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone>.

Работа выполнена по гранту НК-546п “Геофизика” в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.