

Изменение климата в Улуг-Хемской котловине Тувинской горной области

М.Ф. Андрейчик, А.Ф. Чульдум*

*Тувинский государственный университет
667000, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 5.02.2010 г.

Пик потепления климата в Улуг-Хемской котловине уже прошел в 1993 г. (1,5 °С), в начале XXI в. скорость потепления уменьшилась на 37%. Динамика температуры поверхности почвы инерционна по отношению к температуре воздуха.

Ключевые слова: потепление климата, Центр Азии, неоднородность процесса, нелинейные связи, замедление потепления климата; climate warming, the Center of Asia, inertance of thermal parameters, nonlinear relations, slowing down of the warming processes.

Введение

Изменение климата на планете стало реальностью и общепризнанным фактом, хотя об интенсивности дальнейшего процесса и его направленности имеются противоречивые оценки. Это объясняется многообразием частоты и яркой выраженностью аномальных погодных явлений, особенностью физико-географического положения отдельных регионов. В проекте доктрины «Изменения климата и устойчивого развития Российской Федерации» отмечается, что последствия его изменений проявляются на глобальном, региональном, субрегиональном и национальном уровнях. Проявление экстремальных фрагментов с обратным знаком объясняется провоцированием потепления климата по причине разбалансированности климатической системы. На примере последних двух веков в глобальном потеплении прослеживается неоднородность данного явления. В XX и начале XXI вв. выделяются три интервала флуктуаций климата: потепление — 1910–1945 гг., слабое похолодание — 1946–1976 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1976 г. [1, 2].

Самыми теплыми для Улуг-Хемской котловины были 1998 и 2002 гг. Они зафиксировали рекордно высокую среднегодовую температуру (0,1 °С) за весь период наблюдений на метеостанции Кызыл. В новом столетии годы по убыванию температуры распределились в следующем порядке: 2004, 2006, 2003 и 2005. Для земного шара в целом самым теплым был 1998 г., а на следующих пяти местах — все 5 лет начавшегося XXI столетия.

Физико-географическая характеристика котловины

Улуг-Хемская котловина расположена в центральной части Тувинской горной области (Республики Тыва — Тува) на громадном удалении от океанов: от Северного Ледовитого — на 2400 км, Тихого — на 2800 и Индийского — на 2400 км (рис. 1).

Климат резко континентальный. Для зимы характерны морозы (до 50 °С и более), удерживающиеся без оттепелей почти до середины марта, штиль и слабые ветры (0,5–2 м/с). В зимний период котловина находится в зоне обширного и устойчивого азиатского антициклона, центр которого расположен над Монголией. Повторяемость приземных инверсий в течение года достигает более 70% [3].

Методика обработки статистических данных

Для оценки регионального потепления климата нами использована динамика температуры воздуха и поверхности почвы, атмосферных осадков, гидро-термического коэффициента, индекса континентальности, числа дней с морозом, сумм эффективных и активных температур воздуха.

Согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации для оценки изменения климата нами в качестве исходной характеристики использован тридцатилетний период — 1961–1990 гг. Именно от средних значений анализируемых климатических показателей этих лет и принято отсчитывать степень изменения климата. Для выявления тенденции изменения климата нами выделены два

* Михаил Федорович Андрейчик (tgu@tuva.ru, Andreichiko@rambler.ru); Анатолий Федорович Чульдум.

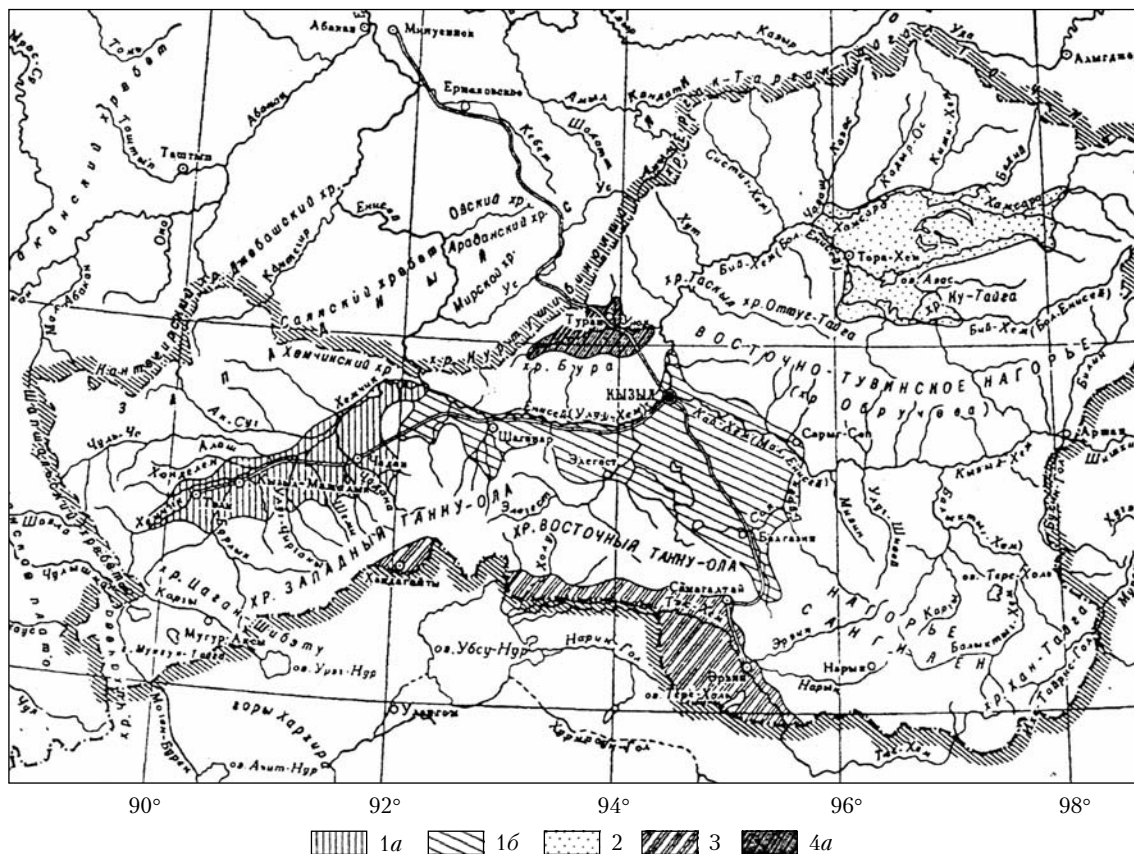


Рис. 1. Орографическая схема Тувинской горной области. Котловины: 1 – Центрально-Тувинская (1а – Хемчикская, 1б – Улуг-Хемская); 2 – Тоджинская; 3 – Убсу-Нурская; 4 – Турано-Уюкская

периода – 1961–1990 и 1977–2006 гг. В качестве исходных статистических данных использованы материалы метеостанций Кызыл (степная зона), Сарыг-Сеп и Сосновка (подтаежные зоны).

Критерием оценки изменения климатических параметров являются коэффициенты линейных трендов, определяемые по методу наименьших квадратов. Они характеризуют среднюю скорость изменений анализируемых характеристик. Мерой существенности тренда является доля дисперсии (в процентах) от полной дисперсии климатической переменной за рассматриваемый интервал времени. Скорректированный коэффициент детерминации (R^2) определяли по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{n=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где $\sum_{n=1}^n (y_i - \hat{y})^2$ – доля дисперсии, объясненная трендом регрессии;

$\sum_{n=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ – общая дисперсия; y_i , \hat{y}

и \bar{y} – соответственно измеренная, средняя сглаженная и средняя измеренная температуры воздуха.

Оценка статистической значимости тренда определяется по 5%-му уровню значимости (с вероятно-

стью 0,95). Выявленные изменения параметров климата реальны (соответствуют действительности), если их величина превосходит ошибку оценки изменений.

Для выявления 11-летней периодичности, связанной с изменением числа солнечных пятен, вычисляются скользящие средние по 11 годам, так как потепление может маскировать эту периодичность. Если в первоначальном ряду скрыта 11-летняя периодичность, то в остаточном ряду она выявится с большей очевидностью. Кстати, сравниваемый период (1977–2006 гг.) лежит в четырех 11-летних циклах солнечной активности: 21-м – 1976–1985 гг., 22-м – 1986–1996 гг., 23-м – 1997–2003 гг. и в начавшемся 24-м цикле.

Результаты исследований

Усредненные значения климатических параметров за указанные периоды временного ряда 1961–2006 гг. представлены в табл. 1.

Приведенная информация климатических показателей Улуг-Хемской котловины вписывается в общий процесс глобального изменения климата с некоторыми отклонениями. Так, за период 1971–2006 гг. температура воздуха по статистическим данным повысилась в среднем на 0,89 °С, на основании коэффициентов линейных трендов – на 1,1 °С, что почти в 1,6 раза выше глобального потепления XX в.

**Динамика климатических параметров метеостанций Улуг-Хемской котловины
за 1961–1990 и 1977–2006 гг.**

Показатель	Кызыл		Сарыг-Сеп		Сосновка	
	1961–1990	1977–2006	1961–1990	1977–2006	1961–1990	1977–2006
Среднегодовая температура воздуха, °С:	–2,6	–1,4	–3,9	–2,9	–2,5	–1,6
– холодный период (I–III, XI–XII мес)	–22,2	–20,3	–22,9	–21,4	–19,3	–18,1
– теплый период (V–IX)	15,3	15,8	13,4	13,9	13,1	13,6
– переходный период (IV, X)	1,7	2,8	0,4	1,5	0,6	1,5
Дата перехода температуры воздуха через 0 °С весной	07.IV	04.IV	11.IV	08.IV	10.IV	08.IV
Число дней с морозами в 1-м полугодии	96	94	100	97	100	98
Дата перехода температуры воздуха через 0 °С осенью	17.X	19.X	13.X	16.X	14.X	18.X
Число дней с морозами во 2-м полугодии	75	73	78	75	79	75
Число дней с морозами (за год)	171	167	178	172	179	173
Сумма эффективных температур воздуха ($t > 5$ °С)	2431	2473	2092	2155	2039	2068
Сумма активных температур воздуха ($t > 10$ °С)	2186	2233	1799	1851	1731	1794
Индекс континентальности, ед./год	86,1	85,3	83,2	83,6	73,5	73,8
Сумма атмосферных осадков, мм	221,3	214,4	354,8	352,7	341,2	345,1
Распределение по сезонам:						
– холодный период	42,2	35,6	56,1	54	52,6	53,7
– теплый период	164,6	166,4	257,6	263,5	247,5	250,8
– переходный период	14,5	12,4	41,1	35,2	41,1	40,6
Гидротермический коэффициент по Селянинову	0,82	0,69	1,75	1,22	1,78	1,19
Среднегодовая температура поверхности почвы, °С:	–0,87	0,02	–1,85	–1,16	–1,14	–0,04
– холодный период	–21,2	–19,4	–23,6	–22,2	–21,5	–20,2
– теплый период	18,1	18,2	18,4	18,4	18,1	18,2
– переходный период	2,5	3,3	1,9	2,9	1,7	2,4

Динамика атмосферных осадков также не согласуется с общей закономерностью потепления климата на Земле: в глобальном масштабе с повышением температуры воздуха количество осадков увеличивается. В Улуг-Хемской котловине количество выпавших осадков увеличилось незначительно – на 0,6–1,6%, что ниже ошибки оценки изменений. Кстати, климатические изменения осадков в масштабах планеты изучены значительно хуже, чем приземная температура воздуха. Это объясняется не только большой изменчивостью данного фактора, но и отсутствием единой методики наблюдений. Так, в России она многократно корректировалась с 1936 по 2000 г. [4].

Усредненные значения климатических параметров, по нашему мнению, характеризующие статическое состояние процесса, не всегда дают объективную оценку изменения климата и не позволяют выявить взаимосвязи между климатическими показателями. По ним можно сделать не совсем корректный вывод о закономерностях изменения анализируемых параметров за 30-летний период.

Реальную картину их динамики можно проследить по линейным трендам сглаженных аномалий временного ряда, которые не всегда описываются уравнениями прямолинейной зависимости. Именно по ним можно определить величину приращения

анализируемого параметра и сравнить ее с ошибкой оценки изменений.

Изменение температуры поверхности почвы

Основным преобразователем лучистой энергии Солнца в тепловую в деятельном слое суши является поверхность почвы. Именно изменение температуры почвы определяет динамику температуры воздуха.

За анализируемый период температура поверхности почвы ($t_{п.п.}$) повысилась на всех метеостанциях в среднем на 0,89 °С. Однако в разрезе отдельных пунктов наблюдения ее изменения в годовом ходе происходили неоднозначно. Повышение анализируемого признака зафиксировано на всех метеостанциях в январе–мае и октябре–декабре, в июне–сентябре в ряде случаев наблюдались отрицательные значения градиентов $t_{п.п.}$. Закономерность динамики приращения температуры поверхности почвы с высокой достоверностью иллюстрирует рис. 2.

Выявленная связь во всех уравнениях (см. подпись к рис. 2) достоверна.

Анализ систематизированных данных позволил обнаружить следующую особенность в потеплении климата. Температура поверхности снега в отдельные

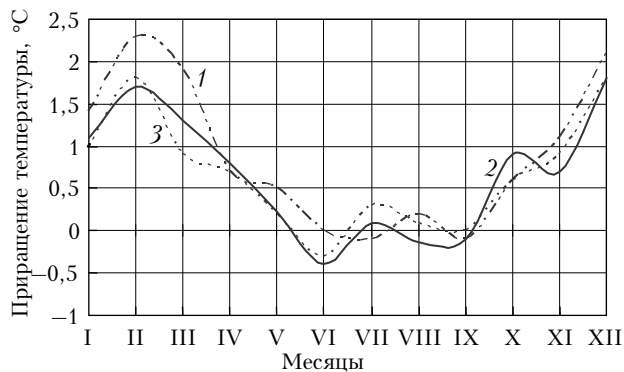


Рис. 2. Динамика приращения температуры поверхности почвы на различных метеостанциях Улуг-Хемской котловины (1 – Кызыл, 2 – Сарыг-Сеп, 3 – Сосновка) за 1977–2006 гг. Кривая 1: $y = -0,0001x^6 + 0,006x^5 - 0,1053x^4 + 0,9344x^3 - 4,254x^2 + 8,5904x - 3,7803$, $R^2 = 0,9736$. Кривая 2: $y = 4 \cdot 10^{-5}x^6 - 0,0009x^5 + 0,003x^4 + 0,1032x^3 - 1,0368x^2 + 2,9188x - 0,8779$, $R^2 = 0,9203$. Кривая 3: $y = -0,0001x^6 + 0,0054x^5 - 0,094x^4 + 0,8177x^3 - 3,6084x^2 + 7,0199x - 3,1205$, $R^2 = 0,9267$

месяцы ниже температуры воздуха, что указывает на интенсификацию циркуляции атмосферы и усиление циклонической деятельности в зимнее время. Вклад холодного периода в потепление климата значительно выше теплого – 65%.

Изменение температуры воздуха

Тепловой режим атмосферы является важнейшим звеном в изучении климата, который во многом определяется теплообменом между приземным воздухом и поверхностью почвы. За период 1977–2006 гг. на всех метеостанциях Улуг-Хемской котловины наблюдалось синхронное повышение температуры воздуха относительно базового периода (1961–1990 гг.). Среднегодовой прирост температуры воздуха (Δt_b) в котловине за анализируемый период составил $1,1^\circ\text{C}$. Однако эти изменения в годовом ходе слишком не однородны. Так, средние темпы повышения температуры воздуха в холодный период года почти в 2 раза выше по сравнению с теплым сезоном.

Наибольший прирост температуры наблюдается в феврале. Это объясняется тем, что во второй половине месяца происходит ослабление антициклонической деятельности в связи с постепенным разрушением инверсионного слоя атмосферы. Показателем усиливающегося процесса является понижение атмосферного давления [5]. Особенности механизма и закономерностей теплообмена между приземным воздухом и поверхностью почвы хорошо прослеживаются на примере метеостанции Кызыл (рис. 3).

Годовой ход температуры воздуха и поверхности почвы аппроксимируется уравнениями 2-й степени, а их приращения – полиномами 6-й степени:
 $t_{п.п.}: y = -1,6551x^2 + 22,417x - 56,052$, $R^2 = 0,9617$;
 $t_b: y = -1,5846x^2 + 21,518x - 55,411$, $R^2 = 0,9664$;
 $\Delta t_b: y = -0,0003x^6 + 0,0106x^5 - 0,1716x^4 + 1,3818x^3 - 5,7001x^2 + 10,629x - 4,4553$, $R^2 = 0,9682$;
 $\Delta t_{п.п.}: y = -0,0001x^6 + 0,006x^5 - 0,1053x^4 + 0,9344x^3 - 4,254x^2 + 8,5904x - 3,7803$, $R^2 = 0,9736$.

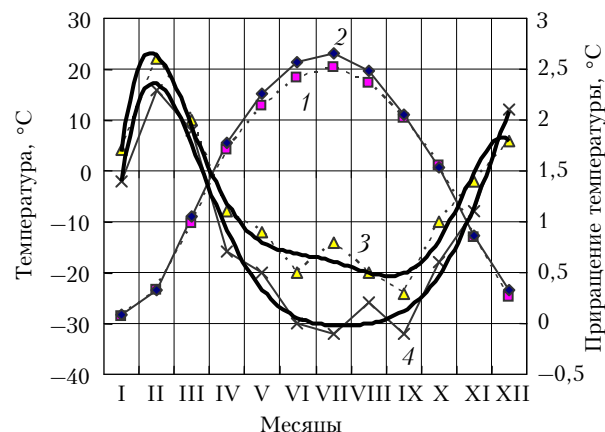


Рис. 3. Динамика годового хода температуры воздуха (t_b), поверхности почвы ($t_{п.п.}$) и их приращений (Δt_b , $\Delta t_{п.п.}$) по усредненным данным 1961–1990 и 1977–2006 гг. Метеостанция Кызыл (1 – t_b , 2 – $t_{п.п.}$, 3 – Δt_b , 4 – $\Delta t_{п.п.}$)

Высокие значения коэффициентов детерминации R^2 колеблются в узком интервале – $0,96–0,97$, что подтверждает достоверность полученных связей.

Параболическая кривая температуры воздуха синхронно следует за температурой поверхности почвы, органически вписываясь в ее форму. Тренды имеют две точки пересечения – в апреле и октябре, явившиеся основанием для выделения переходных месяцев в годовом ходе климатических показателей. Полиномиальные кривые рассматриваемых температур двух сфер и их приращений имеют зеркальное отображение, что говорит об обратных связях между изучаемыми признаками.

На рис. 3 в динамике приращения температур четко просматривается следующая закономерность. Все градиенты температуры воздуха в годовом ходе имеют положительные знаки, аналогичный показатель температуры поверхности почвы в июле и сентябре – отрицательные знаки. Это говорит о том, что эффект потепления климата в первую очередь проявляется в приземном слое атмосферы. Поверхность почвы в климатической системе обладает свойством инерционности. Этим можно объяснить общепринятую упрощенную оценку изменения климата, как правило, по одному параметру – динамике температуры воздуха.

Различия в динамике среднегодовой температуры воздуха и индекса континентальности

Выявленные закономерности изменения среднегодовой температуры воздуха (\bar{t}_b) и индекса континентальности K позволили сделать следующие выводы.

1. Динамике обоих климатических показателей присуща цикличность с неоднородными периодами. Максимумы криволинейных трендов сдвинуты относительно друг друга на 5–7 лет. Максимум K , приходящийся на 1993 г., как бы размытый, он лежит в интервале 1997–2002 гг. (рис. 4).

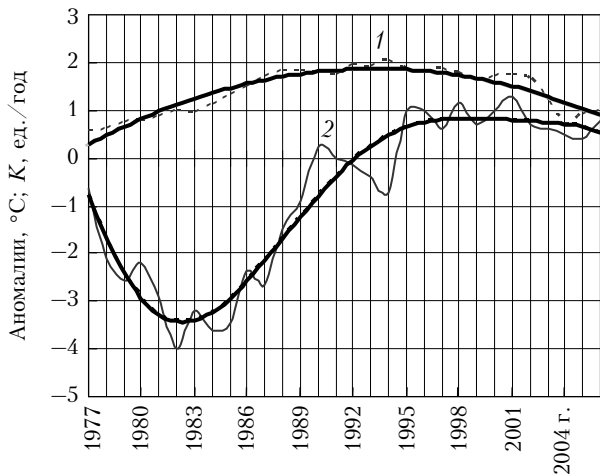


Рис. 4. Полиномиальные тренды аномалий среднегодовой температуры воздуха (ряд 1) и индекса континентальности (ряд 2), сглаженных по 11-летним циклам за 1977–2006 гг. Кривая 1 – $y = -0,0052x^2 + 0,1894x + 0,1542$, $R^2 = 0,9309$; 2 – $y = -8 \cdot 10^{-7}x^6 + 7 \cdot 10^{-5}x^5 - 0,0024x^4 + 0,0322x^3 - 0,1119x^2 - 0,616x - 0,1578$, $R^2 = 0,9268$

Анализ рис. 4 требует абстрактного мышления, так как нетрадиционный подход к снятию информации ($\bar{t}_в$) и K с кривых создает барьер психологического характера. Дело в том, что однозначная направленность трендов носит противоположный смысл для сравниваемых климатических показателей. Обычное восприятие информации с графика: понижение кривой указывает на уменьшение данного признака, а подъем кривой – на возрастание. Однако в нашем случае повышение температуры говорит о потеплении, а повышение индекса континентальности – о тенденции к «похолоданию», об увеличении континентальности климата. Смысл заключается в том, что K является дублирующим показателем изменения климата: увеличение K свидетельствует о проявлении признаков «похолодания» климата, а уменьшение – о смягчении континентальности, о потеплении. На рис. 4 оценка потепления климата по показателю K характеризуется отрицательными градиентами: чем больше их значения (по абсолютной величине), тем интенсивнее потепление, и наоборот. Изложенное абстрагирование позволяет перейти к следующему пункту выводов.

2. Положение экстремумов говорит о том, что пик потепления в Удуг-Хемской котловине уже прошел. Наименьшая континентальность климата была в 1982 г., а максимум среднегодовой температуры воздуха по сглаженным аномалиям – в 1993 г., по измеренным данным – в начале XXI в. На основании экстремумов анализируемых признаков (в контексте потепления климата) можно сделать вывод: среднегодовая температура воздуха инерционна по отношению к индексу континентальности. Их максимумы сдвинуты на 11 лет. Первый максимум лежит в 21-м (с максимальным числом Вольфа – W), второй – в 22-м цикле солнечной активности (также с $\max W$).

Аналогичный анализ по выявлению связей между среднемесячными температурами и индексом кон-

тинентальности был выполнен в разрезе календарного года. В январе параболическая кривая среднемесячной температуры описывается уравнением 2-й степени с плоской вершиной, простирающейся 15-летним отрезком (1985–2000 гг.).

Форма и пространственное положение анализируемых кривых в феврале–мае сходны с закономерностью среднегодовой температуры воздуха, изображенной на рис. 4. В мае кривая температуры имеет небольшой прогиб на отрезке 1980–1985 гг.

В июле кривые изображаются относительно синхронными трендами, их экстремумы приходятся на 1983 и 1999 гг. (рис. 5).

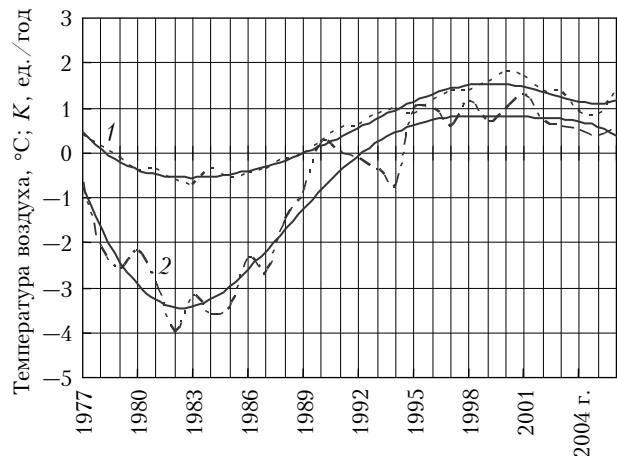


Рис. 5. Полиномиальные тренды аномалий среднемесячной температуры воздуха июля (ряд 1) и индекса континентальности (ряд 2), сглаженных по 11-летним циклам за 1977–2006 гг. Кривая 1 – $y = 2 \cdot 10^{-7}x^6 - 2 \cdot 10^{-5}x^5 + 0,0007x^4 - 0,0114x^3 + 0,1173x^2 - 0,6783x + 1,0332$, $R^2 = 0,9678$; 2 – $y = -4 \cdot 10^{-7}x^6 + 3 \cdot 10^{-5}x^5 - 0,0011x^4 + 0,0121x^3 + 0,0402x^2 - 1,0959x + 0,276$, $R^2 = 0,9274$

Длина полупериодов температуры воздуха и K составляет 16 лет. Первые экстремумы лежат в 21-м (с $\max W$), а вторые – в 23-м цикле солнечной активности. В июле четко изображаются экстремумы: 1980 г. – отрицательные значения, 1993 г. – положительные. Первый экстремум лежит в 21-м, а второй – в 22-м цикле солнечной активности с наибольшими числами Вольфа, разделяющимися 13-летним периодом.

В августе форма тренда среднемесячной температуры (с максимумом в 1995 г.) схожа с рис. 4. Однако он расположен значительно ниже и пересекает кривую K в двух точках – в 1999 и 2006 гг. Тожественная закономерность динамики кривых наблюдается в сентябре. Полиномы пересекаются в 1992 и 2006 гг. соответственно в 22-м и 23-м циклах солнечной активности с максимальным числом Вольфа (рис. 6).

В октябре криволинейная связь температуры воздуха, приближающаяся к прямолинейной зависимости, описывается уравнением 2-й степени. Тренд проходит над кривой K почти параллельно оси абсцисс. В ноябре и июле формы кривых схожи, отличаясь отсутствием минимума на тренде температуры

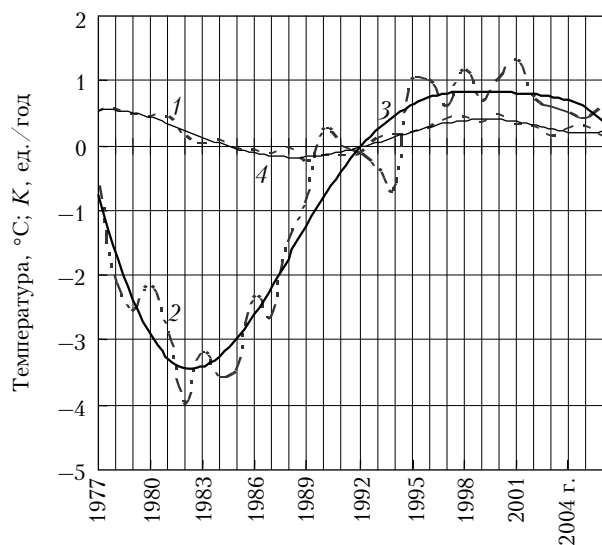


Рис. 6. Полиномиальные тренды аномалий средней температуры воздуха сентября (ряд 1) и индекса континентальности (ряд 2) за 1977–2006 гг.; 3 – полиномиальный ряд 2; 4 – полиномиальный ряд 1

воздуха. В декабре формы кривых и их направленность приближаются к трендам анализируемых климатических показателей, изображенных на рис. 4.

В табл. 2 представлены оценки линейных трендов в изменении приземной температуры воздуха за два периода: 1977–1993 гг. (наибольшее потепление) и 1977–2006 гг. (снижение скорости потепления).

Таблица 2

Оценка линейных трендов осредненных среднегодовых значений температуры воздуха за 1977–2006 гг.

Метеостанция	1977–1993 гг. (16 лет)		1977–2006 гг. (30 лет)	
	<i>b</i>	Δ	<i>b</i>	Δ
Кызыл	0,10	1,7	0,03	0,9
Сарыг-Сеп	0,08	1,4	0,04	1,2
Сосновка	0,08	1,4	0,04	1,2
Среднее	0,087	1,5	0,037	1,1

Примечание. *b* – коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость изменения температуры за год, °С; Δ – суммарное изменение температуры за указанный период, соответствующее линейному тренду, °С.

M.F. Andreichik, A.F. Chul'dum. Climate changes in Ulug-Khemskaia basin of the Tuva mountain region.

The climate warming peak in the Ulug-Khemskaia basin falls on 1993 (1.5 °C), at the beginning of the XXI century warming rate decreased by 37%. The increment of soil surface temperature is inertial with relation to the air temperature.

Из табл. 2 видно, что в последние 30 лет скорость потепления по сравнению с предыдущим 16-летним периодом уменьшилась, тогда как в глобальном масштабе интенсивность потепления увеличивается, что согласуется с [6].

Заключение

Наибольший эффект потепления климата проявляется в приземном слое атмосферы. Температура поверхности почвы в климатической системе обладает свойством инерционности по отношению к температуре воздуха, а последняя – к индексу континентальности. Все градиенты температуры воздуха в годовом ходе в отличие от температуры поверхности почвы имеют положительные знаки. Пик потепления климата в Улуг-Хемской котловине наблюдается в 1993 г., в начале XXI в. скорость потепления уменьшилась на 37%. Среднее повышение температуры воздуха за 1977–1993 гг. составило 1,5, а за 1977–2006 гг. 1,1 °С, что на 21% ниже, чем за аналогичный период в России, и на 33% выше глобального потепления на земном шаре за последние 100 лет (1907–2006 гг.).

1. Винников К.Я., Гройсман П.Я., Лугина К.М., Голубев А.А. Изменение средней температуры воздуха Северного полушария за 1841–1985 гг. // Метеорол. и гидрол. 1987. № 1. С. 45–55.
2. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Мониторинг и вероятностный прогноз короткопериодных колебаний климата // 60 лет Центру гидрометеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 148–170.
3. Андрейчик М.Ф. Загрязнение атмосферы, почв и вод Республики Тыва. Томск: Томск. гос. ун-т, 2005. 400 с.
4. Богданова Э.Г., Ильин Б.М., Гаврилова С.Ю. Современные методы корректировки измеренных осадков и результаты их применения в полярных регионах России и Северной Америки // Метеорол. и гидрол. 2007. № 4. С. 21–44.
5. Андрейчик М.Ф., Монгуш Л.Д.-Н., Мусанова М.Н., Биче-оол Т.Н., Балод Е.В. Изменение температуры воздуха – показатель потепления климата в Тувинской горной области // Проблемы охраны и природопользования: Материалы IX Убсу-Нурского Междунар. симпоз. (16–20 сент. 2008 г., г. Кызыл, Россия). Кызыл: ГУП «Тывполиграф», 2008. С. 321–323.
6. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. М., 2008. 89 с.