

Изменение индекса континентальности на фоне потепления климата в Тувинской горной области

М.Ф. Андрейчик*

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

Поступила в редакцию 7.04.2009 г.

Динамика индекса континентальности описывается полиномом 4-й степени в виде затухающей синусоиды. Континентальность климата в Тувинской горной области за 1977–2003 гг. уменьшалась в среднем на 1,1 °С/10 лет; в начале XXI в. (2001–2006 гг.) наметилась тенденция к увеличению.

Ключевые слова: центр Азии, горный рельеф, индекс континентальности, потепление климата, регрессионный анализ; the Center of Asia; mountain relief, continentality index, climate warming, regression analysis.

Анализ литературных источников показывает, что в период инструментальных наблюдений в качестве основного критерия оценки изменения климата использовалась температура воздуха у земной поверхности. В последние десятилетия существенно расширился спектр изучаемых факторов — атмосферные осадки, облачность, солнечная радиация, речной сток и криосферные процессы. Однако практически нет работ, посвященных динамике важной климатической характеристики — индексу континентальности. Известно, что глобальное потепление зарегистрировано на всей планете, но в России, по нашему мнению, оно выражено более рельефно, поскольку ее территория расположена на самом крупном материке, который в летнее время нагревается довольно интенсивно, но накапливает энергии меньше, чем океан.

Тувинская горная область (Тува) расположена в центре Азии и удалена от океанов на громадные расстояния: от Северного Ледовитого — на 2400, Тихого — на 2800 и Индийского — на 3200 км. Площадь изучаемого региона составляет 168,6 тыс. км², горы занимают около 82%. Почти с четырех сторон ее территория окаймлена сложной системой горных хребтов и нагорий. Климат резко континентальный — зима суровая, лето жаркое [1]. В зимний период Тува находится в зоне обширного и устойчивого Восточно-Сибирского антициклона, центр которого расположен над Монголией. Отмеченные особенности рельефа и синоптические условия оказывают существенное влияние на темпы изменения климата, в том числе и на индекс континентальности, имеющий прикладное значение при изучении сельскохозяйственного производства [2] и здоровья населения (онкологических заболеваний) [3]. По мнению авторов

работы [4], в Тувинской горной области ожидаются изменения климата столь же сильные, как в Арктике, и намного интенсивнее, чем в умеренных широтах Северного полушария в целом.

В последние десятилетия частота циклонов в зимний период Северного полушария возросла, что стало заметно даже в горных котловинах Тувы. Одним из признаков их проявления — более высокая температура воздуха по сравнению с температурой поверхности снега. Однако, по нашим данным, темпы потепления в Туве в начале XXI в. (2001–2006 гг.) уменьшились на 20% [5], что согласуется с прогнозом возможного нового похолодания климата с 2012 г., высказанным ведущим научным сотрудником Пулковской обсерватории Х. Абдусаматовым [6].

Методические подходы в обработке метеорологических данных

1. Для оценки изменения климата Всемирная метеорологическая организация рекомендует в качестве исходной характеристики использовать тридцатилетний период — с 1961 по 1990 г. Именно от этих средних значений метеорологических параметров данного периода и принято отсчитывать степень изменения климата. Нами выделены два основных периода: 1961–1990 и 1977–2006 гг., и один дополнительный — 2001–2006 гг. Полученные результаты основаны на инструментальных данных девяти метеостанций, семь из которых расположены в пяти самых крупных котловинах — Турано-Уюкской, Хемчикской, Улуг-Хемской, Тоджинской и Убсу-Нурской, одна (Мугур-Аксы) — в горной долине р. Каргы (абсолютная отметка 1850 м), вторая (Хову-Аксы — 1042 м) — на плато нагория.

2. Индекс континентальности (K) вычисляли по формуле Горчинского [7]:

* Михаил Федорович Андрейчик (tgu@tuva.ru, andreychik42@mail.ru).

$$K = \frac{1,7A}{\sin \varphi} - 20,4,$$

где A — годовая амплитуда температуры воздуха; φ — географическая широта.

3. В качестве критерия оценки изменения K используется коэффициент линейного тренда, определяемый по методу наименьших квадратов. Он характеризует среднюю скорость изменений анализируемого параметра. Мерой существенности тренда является доля дисперсии K в процентах от полной дисперсии климатической переменной за рассматриваемый интервал времени. Оценка статистической значимости тренда определяется по 5%-му уровню значимости (с вероятностью 0,95). Обнаруженные изменения K реальны (соответствуют действительности), если их величина превосходит ошибку оценки изменений.

4. 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.

Результаты исследований

Усредненные значения индекса континентальности за анализируемые периоды (1961–1990, 1977–2003 и 2001–2006 гг.) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения индекса континентальности за различные временные ряды наблюдений

Метеостанция	1961–1990 гг.	1977–2006 гг.	2001–2006 гг.
Туран	77,4	77,1	75,4
Кызыл	86,1	85,3	85,2
Тээли	76,3	76,8	78,6
Сарыг-Сеп	83,2	83,6	84,0
Сосновка	73,5	73,8	73,9
Тора-Хем	70,6	68,8	70,9
Эрзин	90,2	89,6	90,9
Хову-Аксы	68,9	69,3	69,9
Мугур-Аксы	56,9	56,7	57,3

Усредненные значения K не дают объективной оценки изменения континентальности за 1977–2006 гг. По ним можно сделать не совсем корректный вывод о закономерности изменения индекса континентальности за анализируемый период. Реальную картину динамики K можно проследить по линейным трендам сглаженных аномалий временного ряда (рис. 1). (На всех рисунках приняты условные годы. Дело в том, что аргументы (x — годы), возведенные во 2–4-й степени, в конечном итоге дают громоздкие коэффициенты в уравнениях. Во многих членах уравнения появляется символ E , означающий число 10, за которым следует число со знаком плюс или минус, указывающее знак и степень числа 10. Такие уравнения

трудно воспринимаются читателем. При нашем подходе упрощается структура уравнений, не искажая выявленных закономерностей.)

$$y = 2,8523x^4 - 17,394x^3 + 33,551x^2 - 20,326x + 0,5216$$

$$R^2 = 0,7737$$

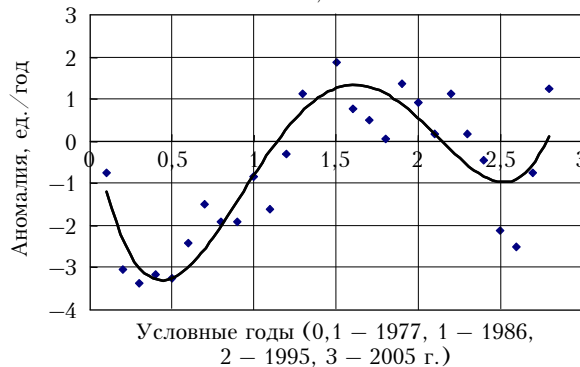


Рис. 1. Линейный тренд аномалий индекса континентальности, сглаженного по 11-летним циклам, Туран 1977–2004 гг.

Именно по ним можно определить величину приращения K и сравнить ее с ошибкой оценки изменений.

Уравнения связи, описывающие закономерности изменения индекса континентальности за анализируемый период (1977–2003 гг.), представлены полиномами 4-й степени:

Туран

$$y = 2,852x^4 - 17,394x^3 + 33,551x^2 - 20,326x + 0,522$$

$$R^2 = 0,77$$

Тээли

$$y = 0,259x^4 - 2,578x^3 + 7,41x^2 - 5,012x - 1,018$$

$$R^2 = 0,91$$

Кызыл

$$y = 1,977x^4 - 13,094x^3 + 28,783x^2 - 21,614x + 1,574$$

$$R^2 = 0,82$$

Сарыг-Сеп

$$y = 0,608x^4 - 6,758x^3 + 19,068x^2 - 14,838x + 0,57$$

$$R^2 = 0,91$$

Сосновка

$$y = 0,665x^4 - 4,672x^3 + 10,353x^2 - 6,884x + 0,298$$

$$R^2 = 0,71$$

Тора-Хем

$$y = 0,975x^4 - 5,234x^3 + 10,178x^2 - 8,386x - 0,639$$

$$R^2 = 0,71$$

Эрзин

$$y = -0,413x^4 + 0,726x^3 + 3,584x^2 - 6,696x + 0,106$$

$$R^2 = 0,86$$

Хову-Аксы

$$y = 0,783x^4 - 5,666x^3 + 13,074x^2 - 8,85x - 0,163$$

$$R^2 = 0,84$$

Мугур-Аксы

$$y = 2,772x^4 - 16,372x^3 + 31,333x^2 - 19,245x + 0,295$$

$$R^2 = 0,93.$$

Анализ линий регрессий аномалий индекса континентальности показывает, что все минимумы кривых расположены в 21-м цикле солнечной активности (1976–1985 гг.) и совпадают, как правило, с максимумами чисел Вольфа (W). Аномалии всех метеостанций имеют отрицательные значения и колеблются в интервале 1,1–3,65, что указывает на уменьшение значений K . Максимумы кривых расположены в 22–23-летних циклах солнечной активности и также соответствуют в основном областям максимальных значений Вольфа. Исключением является метеостанция Кызыл, где максимум приходится на 1995 г., а число W приближается к минимуму.

Аномалии всех максимумов кривых имеют положительные величины (0,9–1,7). Периоды между минимумами и максимумами кривых колеблются в интервале 11–16 лет. Особая закономерность проявляется на метеостанции Тээли. Линейный тренд здесь плавно усредняет 21-летний период двух циклов: 22-летний с максимумом в 1990 г. и 23-й с максимумом в 2001 г. Несколько другая закономерность выявлена на метеостанции Тора-Хем, отличающейся относительно коротким вегетационным периодом. Здесь кривая динамики аномалий индекса континентальности также описывается полиномом 4-й степени, но вогнутой кривой. Минимальное отклонение аномалий пологого участка кривой составляет –3. С 1983 г. наблюдается незначительное увеличение аномалий до 1997 г., а затем резкое повышение до 0,8 в 2003 г. Для выявления солнечно-земных связей с индексом континентальности целесообразно провести анализ его декомпозиционных составляющих – годовой амплитуды температуры воздуха (A) и температуры июля и января.

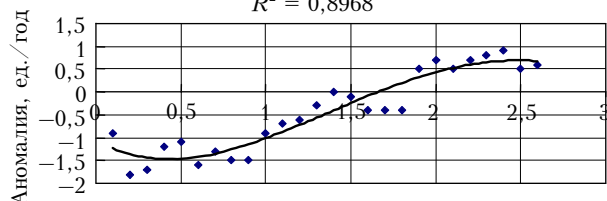
Линейные тренды сглаженных аномалий амплитуды температуры воздуха за 1977–2003 гг. анализируемых метеостанций описываются аналогичными полиномами 4-й степени. Закономерность линейного тренда аномалии годовой амплитуды температуры воздуха показана на примере метеостанции Тээли (рис. 2).

Анализ сглаженных линейных трендов индекса континентальности и годовой амплитуды температуры воздуха показывает, что общими между ними являются следующие моменты:

1. Линии регрессии климатических изменений носят синусоидальный характер с двумя минимумами и одним максимумом: первый – в 1977–1981, второй – в 1994–2002, максимум – в 1982–1993 гг.

2. Все минимумы кривых расположены в 21-летнем цикле солнечной активности (1976–1985 гг.) в областях максимальных чисел Вольфа.

$$y = 0,0742x^4 - 0,9344x^3 + 2,9842x^2 - 2,0807x - 1,0568$$
$$R^2 = 0,8968$$



Условные годы (0,1 – 1977, 0,5 – 1981, 1 – 1986, 1,5 – 1991, 2 – 1996, 2,5 – 2001, 3 – 2006 г.)

Рис. 2. Линейный тренд аномалий амплитуды годовой температуры воздуха, сглаженных по 11-летним циклам, метеостанция Тээли 1977–2002 гг.

3. Аномалии минимумов кривых имеют отрицательные значения, что указывает на замедление процесса понижения анализируемых климатических параметров на данном отрезке временного ряда по сравнению с базовым периодом (1961–1990 гг.).

4. Все максимумы кривых расположены в 22- и 23-летнем циклах солнечной активности.

Отличительные черты

1. В среднем размах аномалии индекса континентальности в 1,5 раза больше годовой амплитуды температуры воздуха. Исключением является 21-й цикл солнечной активности, где размах K уменьшился в 2,2 раза.

2. Аномалии минимумов и максимумов K больше A соответственно в 1,8 и 2 раза.

3. Аномалии всех максимумов кривых индекса континентальности имеют положительные значения, а амплитуды температуры воздуха – 66,7%; на трех метеостанциях – Туран, Кызыл и Сарыг-Сеп – отрицательные величины, что составляют 33,3% от всех пунктов наблюдений.

4. Периоды между минимумами и максимумами индекса континентальности составляют 11–16, амплитуды температуры воздуха – 14–17 лет.

5. Второй минимум четко выражен в линиях регрессий индекса континентальности, в годовой амплитуде температуры воздуха он зафиксирован только на метеостанции Сарыг-Сеп.

Дополнением к особенностям годовой амплитуды температуры воздуха является следующая информация. Минимумы аномалий кривых A соответствуют, как правило, максимальным числам Вольфа с отклонением 1–2 года. Лишь на двух метеостанциях (с наибольшими абсолютными отметками) – Эрзин (1100 м) и Мугур-Аксы (1850 м) – минимумы отклоняются от числа Вольфа соответственно на 5 и 3 года. Все точки максимумов кривых аномалий A лежат на середине временного интервала двух экстремумов солнечной активности.

Анализ линейных трендов температуры воздуха января и июля

Закономерность сглаженных аномалий температуры воздуха января представлена на рис. 3.

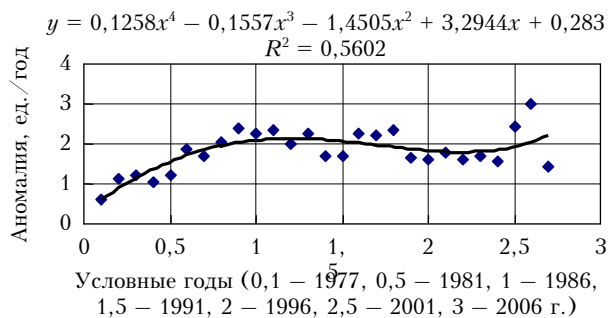


Рис. 3. Линейный тренд аномалий температуры воздуха, сглаженных по 11-летним циклам. Метеостанция Сарыг-Сеп, январь 1977–2003 гг.

Математическая формализация ее у восьми метеостанций выражается полиномами 4-й степени и лишь в одном пункте наблюдений – Сосновка – уравнением 2-й степени. Кстати, в анализируемом блоке теснота связи между коррелируемыми признаками на 36% ниже по сравнению с аналогичной закономерностью индекса континентальности и на 56% ниже по сравнению с температурой воздуха июля. Максимальные значения коэффициентов детерминации в январе зафиксированы лишь на двух метеостанциях – Кызыл (0,75) и Эрзин (0,90), на остальных их значения колебались в интервале 0,50–0,57. Сравнимые показатели индекса континентальности и температуры июля варьируют соответственно в пределах 0,71–0,93 и 0,90–0,98.

Из анализа графического материала следует, что больше половины (55,6%) минимумов сглаженных аномалий температуры воздуха в январе приходится на годы с наименьшим числом Вольфа, на одной трети (33,3%) метеостанций минимумы четко не зафиксированы, так как форма кривой отличается от характерной параболы с максимумом в 1992 г. Из общей закономерности выпадает метеостанция Мугур-Аксы с наибольшей абсолютной отметкой (1850 м), имеющая два минимума (в 1979 и 2003 гг.) с максимальными числами Вольфа. Здесь максимум кривой также соответствует наибольшему числу Вольфа, что согласуется с закономерностью индекса континентальности. В максимумах кривых наблюдается обратная закономерность, характерная для минимумов: 55,6% приходится на годы с наибольшим числом Вольфа. В январе по сравнению с июлем между минимумом и максимумом более четко наблюдается цикличность со строгой периодичностью 11 лет, лишь на метеостанции Мугур-Аксы период равен 13 годам.

Закономерность аномалий температуры воздуха июля идентична кривой индекса континентальности (рис. 4).

Математически она описывается также полиномами 3-й и 4-й степеней.

Все минимумы кривых сглаженных аномалий температуры воздуха июля лежат в 21-м цикле (1976–1985 гг.) солнечной активности в области максимальных чисел Вольфа, с равномерным распределением по трем годам – 1977, 1979 и 1980. На всех метеостанциях (за исключением метеостанции Сарыг-Сеп) аномалии имеют отрицательные значения (–0,1 до –0,5).

$$y = 0,4897x^4 - 3,1269x^3 + 6,0377x^2 - 2,5627x - 0,1093$$

$$R^2 = 0,985$$

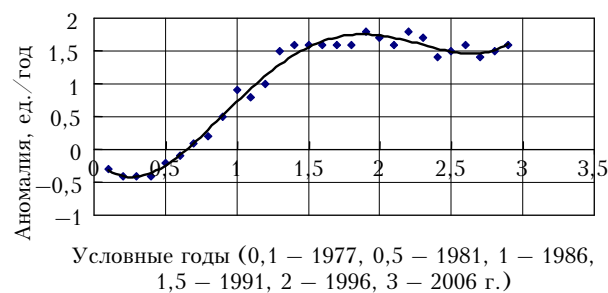


Рис. 4. Линейный тренд аномалий температуры воздуха, сглаженных по 11-летним циклам. Метеостанция Туран, июль 1977–2005 гг.

Максимумы линейных трендов лежат в 22-м (44,4%) и 23-м (55,6%) циклах солнечной активности. Более половины (55,6%) из них приходится на годы с наибольшим числом Вольфа. Все значения аномалий – положительные и колеблются в интервале 1,3–2,5. Периоды между минимумами и максимумами кривых составляют: 13–14 лет – 33,3%, 18–11,1%, 21–24 года – 55,6%.

Общие черты динамики аномалии температуры воздуха января и июля:

- минимумы аномалий приходятся на 21-летний цикл солнечной активности – на области высоких чисел Вольфа (1977–1980 гг.);

- максимумы аномалий имеют положительные величины.

Отличительные черты динамики аномалий температуры воздуха января и июля:

- минимумы аномалий температуры января – положительные числа, июля – отрицательные. Это указывает на то, что скорость потепления климата в холодный период выше, чем в теплый. В январе наблюдается однонаправленный положительный процесс изменения температуры воздуха – линии регрессии представлены в основном в виде параболы.

Таблица 2

Коэффициенты линейных трендов аномалий индекса континентальности (ед./год) характерных интервалов временного ряда (1977–2003 гг.), описываемых полиномами

Метеостанция	Понижение, 1977–1981 гг.	Повышение, 1982–1993 гг.	Понижение, 1994–2003 гг.	Среднее
Туран	–0,46	0,17	–0,21	–0,16
Тээли	–0,09	0,14	–0,35	–0,10
Кызыл	–0,41	0,26	–0,34	–0,16
Сарыг-Сеп	–0,42	0,46	–0,19	–0,05
Сосновка	–0,31	0,10	–0,17	–0,13
Тора-Хем	–0,46	0,02	0	–0,15
Эрзин	–0,36	0,19	–0,28	–0,15
Хову-Аксы	–0,14	0,15	–0,17	–0,05
Мугур-Аксы	–0,53	0,29	–0,04	–0,09
Среднее	–0,35	0,20	–0,25	–0,11

Ее анализ показывает, что темпы потепления климата в начале XXI в. заметно снизились. Закономерность динамики температуры воздуха июля идентична кривой индекса континентальности. В июле 1977–1980 гг. в противоположность январю происходит понижение температуры воздуха по сравнению с базовым периодом, причем процесс «похолодания» в 1,4 раза меньше интенсивности потепления января;

– темпы потепления климата с 1981 по 1993 г. в январе в 2,2 раза выше, чем в июле.

Комплексный анализ составляющих индекса континентальности позволил выявить синусоидальный характер анализируемого показателя в пределах рассмотренного периода (1977–2003 гг.). Дифференцированный подход в регрессионном анализе определил среднюю скорость изменения K в выявленных временных интервалах (табл. 2).

Заключение

Изменение индекса континентальности описывается полиномами 4-й степени в виде затухающей синусоиды. Первые минимумы лежат в 21-летнем цикле (1976–1985 гг.), вторые – в 23-летнем (2002–2003 гг.), максимумы – в 22–23-летнем циклах солнечной активности и совпадают, как правило, с наибольшими числами Вольфа. Периоды между минимумами и максимумами кривых составляют 11–16 лет. Аномалии анализируемого климатического показателя на всех метеостанциях имеют отрицательные значения, что указывает на уменьшение индекса континентальности по сравнению с базовым периодом

(1961–1990 гг.). Между индексом континентальности и амплитудой температуры воздуха прослеживается почти функциональная связь. Закономерность динамики аномалий температуры воздуха июля идентична кривой индекса континентальности.

Континентальность климата в Тувинской горной области за 1977–2003 гг. в среднем уменьшается на 1,1 °C/10 лет. В 2001–2006 гг. в связи с уменьшением интенсивности потепления климата коэффициенты линейных трендов индекса континентальности на всех метеостанциях имеют положительные значения.

1. *Андрейчик М.Ф.* Загрязнение атмосферы, почв и вод Республики Тыва. Томск: Том. гос. ун-т, 2005. 400 с.
2. *Климатические ресурсы и их прикладное использование* / Под ред. А.А. Исаева, М.А. Петросянца. М.: Изд-во МГУ, 1989. 159 с.
3. *Писарева Л.Ф., Бояркина А.П., Тахауов Р.М., Карпов А.Б.* Особенности онкологической заболеваемости населения Сибири и Дальнего Востока. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2001. 411 с.
4. *Алтай-Саянский регион* // Региональные изменения климата и угроза для экосистем. 2001. Вып. 1. 125 с.
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 // Экосистемы Центральной Азии: исследования, проблемы охраны и природопользования: Материалы IX Убсу-Нурского Международного симпозиума (16–20 сентября 2008 г., г. Кызыл, Россия). Кызыл: ГУП «Тывполиграф», 2008. С. 321–323.
6. *Зеленый мир.* 2007. № 23–24.
7. *Хромов С.П.* Метеорология и климатология для географических факультетов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 499 с.

M.F. Andreychik. The variability of the continentality index against the background of the climate warming in Tuva mountain area.

The continentality index is described by polynomial of the fourth degree as a damped sinusoidal wave. The climate continentality of Tuva mountain area has decreased by 1.1 °C/10 years during 1977–2003; we can witness a tendency to its growth in the beginning of XXI century.