

Таварткиладзе К.А.¹, Амиранавили А.Г.²
Институт географии им. Вахушти Багратиони, Грузия
Институт геофизики им. М. Нодиа, Грузия

УДК 551.582

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В Г. ТБИЛИСИ

Введение

В последние годы в связи с ростом индустриального загрязнения внешней среды особую актуальность приобрели проблемы влияния этих загрязнений как на изменение глобального, регионального и локального климата в целом, так и на изменчивость отдельных климатообразующих факторов. Особое значение эта проблема приобрела в нашей стране. Для Грузии, имеющей небольшую территорию, на которой можно встретить почти все виды климатов – от влажных субтропиков с высоким температурным фоном при избыточной увлажненности до холодного климата зоны вечных снегов и ледников, весьма существенны не только региональные эффекты изменения климата, но и эффекты локального масштаба (города, окрестности крупных источников эмиссии загрязнений атмосферы и др.).

Учитывая указанное, в 1996 году были начаты и продолжаются по сей день широкомасштабные исследования современного изменения климата Грузии. В первую очередь была проведена инвентаризация парниковых газов в Грузии, изучены пространственно-временные вариации полей температуры, осадков, облачности, аэрозольного загрязнения воздуха, поверхностного покрова и других климатообразующих параметров [1,4].

В настоящей работе предпринята попытка проведения оценки ожидаемых изменений температуры воздуха в Тбилиси.

Методика

Рассмотрено два метода прогнозирования. Первый метод заключается в прогнозировании кривой роста температуры воздуха и ее доверительных интервалов [2,5]. Суть второго метода описана в [4].

В работе использованы следующие статистические параметры (с соответствующими обозначениями): Mean – среднее, Max – максимум, Min – минимум, Interv – вариационный размах, Median – медиана, Mode – мода, St Dev – стандартное отклонение, σ_m – стандартная ошибка среднего, C_v – коэффициент вариации (%), A_s – коэффициент асимметрии, K – коэффициент эксцесса, Count – число случаев, R – коэффициент линейной корреляции, R_s – коэффициент ранговой корреляции Спирмэна, R_k – коэффициент ранговой корреляции Кендэла, R_a – коэффициент автокорреляции с лагом 1 год, K_{dw} – критерий Дарбина-Уотсона, α – уровень значимости, T – среднегодовая температура воздуха.

Доверительный интервал для среднего – CONF, а также его нижний $CONF_L$ и верхний $CONF_U$ уровни с заданной вероятностью определялись как без учета, так и с учетом автокорреляции в рядах наблюдений. В последнем случае для доверительного интервала вводилась поправка на значение коэффициента автокорреляции с лагом $L = 1$ год.

Результаты

Первый метод.

В табл.1 представлены статистические характеристики температуры воздуха в Тбилиси в период с 1906 по 2006 гг.

Таблица 1

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Mean	13,0	K	0,43	99% (+/-) CONF	0,17
Min	11,1	Count	101	99% $CONF_L$	12,83
Max	14,8	R	0,35	99% $CONF_U$	13,18
Interv	3,7	α для R	0,01	99% (+/-) CONF с учетом R_a	0,22
Median	13,0	R_k	0,24	99% $CONF_L$ с учетом R_a	12,79
Mode	13,2	α для R_k	0,0005	99% $CONF_U$ с учетом R_a	13,22
St Dev	0,68	R_s	0,34	K_{dw}	1,8
σ_m	0,07	α для R_s	0,0006	α для K_{dw}	0,05
C_v (%)	5,2	R_a	0,21	a	0,00817
A_s	-0,10	α для R_a	0,05	b	12,6

Как следует из табл.1 температурный ряд в Тбилиси неслучайный (коэффициенты R , R_k и R_s значимо выше предельных значений) и автокоррелирован (коэффициент R_a также значимо выше предельных значений). Тренд температуры воздуха удовлетворительно описывается линейным уравнением (критерий K_{dw} имеет соответствующее значение) с коэффициентами регрессии a и b.

Исходя из указанного в соответствие с [2,5] получена прогностическая модель линейного роста T и ее 99% доверительного интервала в период с 2007 по 2055 гг. (рис.1). В табл.2 представлены прогностические величины средней T и 99% значения ее нижнего и верхнего уровней с 2007 по 2055 гг по пятилетним интервалам. Отметим, что значения

99% $CONF_L$ и 99% $CONF_U$ как без учета, так и с учетом R_a (табл.1) попадают в диапазон тех же значений доверительных границ, представленных в табл.2.

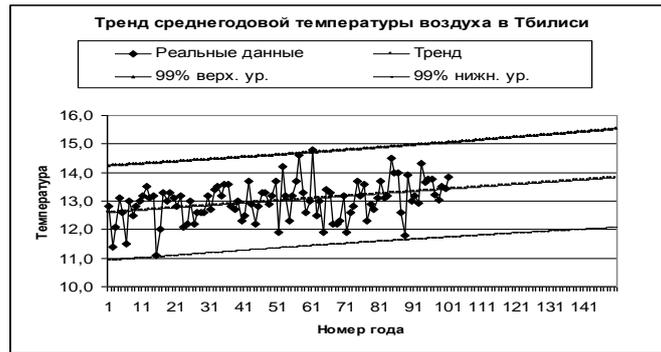


Рис. 1. Тренд среднегодовой температуры воздуха в Тбилиси. 1906-2006 - реальные данные. 2007 - 2055 - экстраполяция по расчетам тренда в 1906-2006 гг.

Таблица 2

Год	99% $CONF_L$	T	99% $CONF_U$	Год	99% $CONF_L$	T	99% $CONF_U$
2010	11,8	13,4	15,1	2035	12,0	13,7	15,3
2015	11,8	13,5	15,2	2040	12,0	13,7	15,4
2020	11,9	13,5	15,2	2045	12,0	13,7	15,4
2025	11,9	13,6	15,3	2050	12,1	13,8	15,5
2030	11,9	13,6	15,3	2055	12,1	13,8	15,5

Второй метод.

С целью долгосрочного (климатического) прогнозирования температуры в работе [4] была представлена схема, в основе которой было разложение случайной функции в многомерном пространстве на естественные ортогональные составляющие [3]. В качестве примера на основе данных за период 1846 – 1985 годов (с одним частным вектором) был сделан прогноз для среднегодовых температур на период 1986 – 1990 годов и затем было произведено сравнение фактических данных с прогностическими. Фактические и прогнозируемые температуры для прогностического периода представлены на рис.2 (Фактические - сплошная линия - и спрогнозированные - пунктирная - значения температуры для Тбилиси, для периода 1986 – 1990 годов).

В работе [4] прогнозирование было произведено не для среднегодовых, а для отдельных месяцев, а значения среднегодовых температур было рассчитано осреднением данных о температуре прогнозируемых месяцев. Погрешность в упомянутой статье оценена осреднением погрешностей прогнозируемых месячных температур и она колеблется в пределах от 9,4 до 14,3%. В действительности, если ограничимся прогнозированием только среднегодовых температур, она значительно меньше и в течение пяти лет колеблется в пределах от 0 до 6,9%. Надо отметить, что прогностическая схема предсказала тенденцию потепления в 1989 году по сравнению с предыдущим и последующим годами.

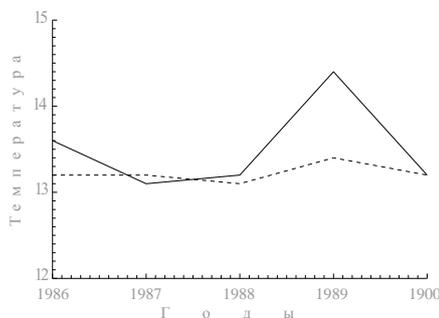


Рис.2

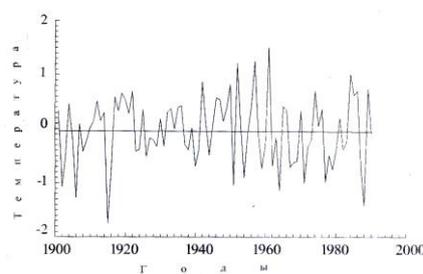


Рис. 3

Применив для прогнозирования вышеуказанную схему, мы попытались установить вероятнейшую картину изменений температуры для Тбилиси на период до 2055 года. Процесс прогнозирования по вышеупомянутой схеме состоит из трёх этапов. Первый этап предусматривает представление среднегодового, дискретного температурного ряда за период, предшествующий прогнозируемому, в виде такой непрерывной функции, согласно которой сравнение определённых температурных рядов с фактическими дают минимальную дисперсию. На втором этапе из указанных функций должна быть подобрана такая, которая в течение прогнозируемого периода сохраняет тенденцию изменения

предыдущего периода. На третьем этапе с помощью выбранной функции должны быть определены наивероятнейшие значения ожидаемой температуры для прогнозируемого периода.

Легко догадаться, что второй этап исключает возможность успешного прогнозирования в том случае, когда процесс формирования температурного поля претерпевает резкие изменения (например «ядерная зима», что может быть следствием термоядерной войны между государствами). Такие изменения в природе происходят редко, поэтому мы считаем, что в процессе текущего глобального потепления предложенная схема может прогнозировать температурное поле с большой точностью.

Данные температурных наблюдений для Тбилиси, которые можно использовать для прогнозирования, существуют с 1846 года. Однако тенденция потепления отмечается с девятисотых годов [4]. Поэтому, исходя из второго этапа прогнозирования, использовались фактические данные за 1906 – 1995 годы. Данные за 1996 – 2005 годы использовались для сравнения спрогнозированных и фактических данных и было проведено прогнозирование для десятилетних периодов для 2006 – 2055 годов.

Первый этап. Критерий подбора функции температурных рядов для периода, предшествующего прогнозируемому, состоит в следующем: определяется дисперсия температурных рядов относительно среднего арифметического (средняя годовая температура в Тбилиси в период 1906 – 1995 годов составляла 12,93°C, а дисперсия – 0,450); затем подбирается та или иная функция и вычисляется дисперсия ряда относительно выбранной функции; если дисперсия выбранной функции уменьшается относительно дисперсии среднего арифметического, то такая функция удовлетворяет обязательному (но не достаточному) условию для прогнозирования.

Из числа проверенных функций обязательным для первого этапа условиям удовлетворяют несколько из них. Приведём их в порядке уменьшения значения дисперсии.

1. Линейная функция

$$T = X_0 + X_1 N \quad (1)$$

Здесь и ниже везде N – последовательный пересчёт годов, а X_1 - эмпирический коэффициент.

После определения входящих в уравнение (1) эмпирических коэффициентов ($X_0 = 12,634$; $X_1 = 0,0066$), были вычислены температурный ряд и соответствующая дисперсия.

Оказалось, что формула (1) уменьшает дисперсию, по сравнению со средней арифметической, на 3,3%.

2. Полином второй степени

$$T = \sum_{i=0}^2 X_i N^i \quad (2)$$

Значения эмпирических коэффициентов, входящих в формулу (2), следующие: $X_0 = 12,496$; $X_1 = 0,0156$; $X_2 = -9,924 \cdot 10^{-5}$. Согласно вычисленным по формуле (2) результатам, значение дисперсии по сравнению со средней арифметической, уменьшается на 3,72%.

3. Полином третьей степени

$$T = \sum_{i=0}^3 X_i N^i \quad (3)$$

Значения эмпирических коэффициентов: $X_0 = 12,274$; $X_1 = 0,0441$; $X_2 = -8,786 \cdot 10^{-4}$; $X_3 = 5,709 \cdot 10^{-6}$. Данная формула уменьшает дисперсию на 4,44%.

4. Периодическая функция

$$T = A \sin(2\pi N/L + F) \quad (4)$$

где A – амплитуда, L – длина полного периода, F – начальная фаза. A, L и F определены итерационным путём, их значения соответственно 0,28° C, 23,68 лет, 290°. Вычисленная по формуле (4) дисперсия температурного ряда меньше средней арифметической на 4,45%.

5. Полином четвёртой степени

$$T = \sum_{i=0}^4 X_i N^i \quad (5)$$

Значения эмпирических коэффициентов: $X_0 = 12,360$; $X_1 = 0,0260$; $X_2 = 7,600 \cdot 10^{-6}$; $X_3 = -9,383 \cdot 10^{-6}$; $X_4 = 8,292 \cdot 10^{-8}$. Данная формула уменьшает дисперсию на 4,51%.

6. Полином пятой степени

$$T = \sum_{i=0}^5 X_i N^i \quad (6)$$

Полином пятой степени, эмпирические коэффициенты которого: $X_0 = 12,213$; $X_1 = 0,0711$; $X_2 = 0,339 \cdot 10^{-2}$; $X_3 = 8,920 \cdot 10^{-5}$; $X_4 = -1,132 \cdot 10^{-6}$; $X_5 = 5,342 \cdot 10^{-9}$, уменьшает дисперсию на 4,68%.

7. Полином шестой степени, уменьшает дисперсию больше чем все остальные

$$T = \sum_{i=0}^6 X_i N^i \quad (7)$$

и значения его эмпирических коэффициентов: $X_0 = 11,674$; $X_1 = 0,295$; $X_2 = -0,0272$; $X_3 = 1,120 \cdot 10^{-3}$; $X_4 = -2,224 \cdot 10^{-5}$; $X_5 = 2,089 \cdot 10^{-7}$; $X_6 = -7,458 \cdot 10^{-10}$. Она уменьшает дисперсию на 6,33%.

Вариации среднегодовой температуры в Тбилиси в период 1906 – 1995 годов наиболее точно представляет полином шестой степени с представленными выше коэффициентами. Полиномы же более высоких степеней, по сравнению со средним арифметическим, вызывают резкий рост дисперсии. Таким образом, все рассмотренные выше функции принципиально возможно использовать для прогнозирования, если они удовлетворят условиям второго этапа.

Второй этап. Как было отмечено, второй период должен определить, какая из выбранных функций и насколько повторяет ту тенденцию изменения температуры, что была характерна для периода, предшествовавшему прогнозируемому. Период до прогноза, или средний годовой температурный ряд за период 1906 – 1995 гг., характерен постепенным ростом, примерно в пределах 0,007% ежегодно. Одновременно с ростом T наблюдается незначительный рост стандартного отклонения. Для установления того, насколько выбранные функции сохраняют отмеченные тенденции в прогнозируемый период, необходимо установление вида этих функций с $N = 91$ до $N = 150$.

Проверка показала, что в прогнозируемый период полиномы второй и шестой степеней претерпевают значительное уменьшение, т.е. они не могут быть основой прогнозной функции. Полиномы третьей, четвёртой и пятой степеней в прогнозируемый период сохраняют тенденцию роста. Интенсивность роста подлежит регулировке. Однако они обладают очень большим стандартным отклонением, вследствие чего их использование для прогнозирования практически невозможно. Несмотря на это мы считаем, что их практическое применение принесёт определённую пользу в определённых сферах исследования атмосферных процессов, поэтому необходимо полностью представить значения необходимых параметров, необходимых для их использования.

Что же касается линейных и периодических функций, они полностью отвечают принципам предшествующего периода, но не дают возможности прогнозирования дисперсии. Для прогнозирования дисперсии мы прибегли к следующему способу.

От фактических значений среднегодовых температур за 1906 – 1995 годы вычли значения, полученные по формулам (1) и (4). Полученные ряды, которые представлены на рис. 3 и показывают изменения стандартных отклонений температуры воздуха в Тбилиси за период 1906 – 1995 гг по десятилетним периодам (1 – фактическая дисперсия, 2 – средняя десятилетних периодов, 3 – стандартное отклонение) определяют ежегодные вариации температуры без тенденции потепления и цикличности. Именно полученный ряд даёт величину стандартного отклонения и поэтому мы попытались изучить его изменения за данный период.

Если произвести линейную аппроксимацию представленных на рис.3 вариаций, то выражение изменений стандартных отклонений за 1906 – 1995 годы примет следующий вид:

$$D = 0,491 + 0,0223 n \quad (8)$$

С использованием формулы (8) на рис.3 проведены границы диапазона средних и стандартных отклонений для десятилетних периодов. Они показывают, что изменения температурного поля сопровождаются незначительным ростом дисперсии.

Таким образом, из выбранных на первом этапе функций прогнозирования температуры, наилучший результат можно ожидать по формулам (1) и (4).

Надо отметить, что их одновременное применение возможно с применением метода суперпозиции, а для прогнозирования суперпозиции целесообразно использование формулы (8).

Третий этап. Формулы (1) и (4) дают изменение температуры без дисперсии. Изменения температурного поля, вычисленные за период 1906 – 2055 гг по указанным формулам без учёта дисперсии, принимает вид, представленный на рис. 4. Учёт ожидаемой величины дисперсии возможен с использованием формулы (8). Однако мы считаем более целесообразным представление климатических прогнозов по десятилетним периодам, вероятность оправданности которых значительно выше, чем у ежегодных.

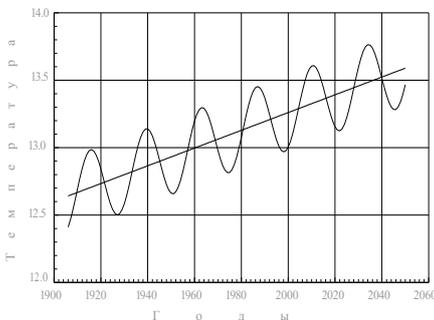


Рис. 4

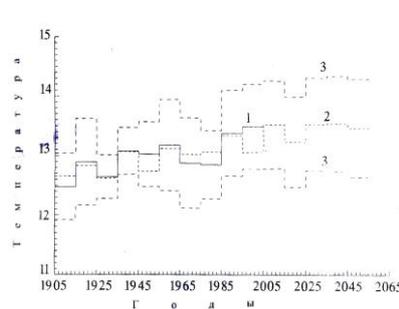


Рис. 5

Как предшествующий, так и прогнозируемый период мы разделили на десятилетние периоды, для каждого из десятилетних отрезков определили как фактические, так и вычисленные по формулам значения и соответствующие стандартные отклонения. Изменения температуры по десятилетним периодам для Тбилиси за 1906-2055 годы представлены на рис. 5 (1 – фактическая, 2 – вычисленные по линейной (1) и периодической (4) формулам, 3 – стандартные отклонения).

Как видно из рис. 4, максимальное отклонение по десятилетним периодам между фактическими и вычисленными температурами отмечалось в 1985 – 1995 гг и оно составило 0,4°C, что составляет 3% от средней температуры в указанный период.

В течение последующих 50 лет в Тбилиси ожидаются следующие значения средних по десятилетиям температуры воздуха: 2006-2015 гг. – 13,52°C, 2016-2025 гг. – 13,23 °C, 2026-2035 гг. – 13,53 °C, 2036-2045 гг. – 13,54 °C, 2046-2055 гг. – 13,45 °C. Отметим, что прогностические значений T, полученный с использованием второго метода, попадают а доверительный интервал для T, рассчитанный по первому методу.

Заклучение

Для оценки ожидаемых изменений температуры воздуха в Тбилиси было использовано два прогностических метода. 1 – классический метод прогнозирования кривой роста температуры воздуха и ее доверительных интервалов. 2 – предложенный первым автором данной работы метод, опубликованный ранее в [4].

В соответствие с первым методом нижний уровень 99%-го доверительного интервала для T с 2006 г. по 2055 г. меняется от 11,8 °C до 12,1 °C, а верхний уровень – от 13,4°C до 15,5 °C. В соответствие со вторым методом в течение последующих 50 лет самая низкая температура (13,23 °C) ожидается в период 2016 – 2025 гг. , а самая высокая - в 2036-2045 гг. - 13,54 °C. Оба метода дополняют друг друга. По крайней мере первый можно использовать для контроля второго. Преимуществом второго метода является то, что в тренде температуры он позволяет прогнозировать ее колебания.

ლიტერატურა - REFERENCES – ЛИТЕРАТУРА

1. Budagashvili T., Karchava J., Gunia G., Intskirveli L., Kuchava T., Gurgenzidze M., Amiranashvili A., Chikhladze T., 1999, Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Sinks, Georgia's Initial National Communication on Under the United Nations Framework Convection on Climate Change, Project GEO/96/G31, Tbilisi, 137 p.
2. Дуброва Т.А., 2003, Статистические методы прогнозирования в экономике, М., Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 50 с.
3. Обухов А.М., 1960, О статистических ортогональных разложениях эмпирических функций. Изв. АН СССР, сер. Геофиз., 13, с.432 – 439.
4. Таварткиладзе К., Элизбарашвили Э., Мумладзе Д., Вачнадзе Дж., 1999, Эмпирическая модель изменений приземного температурного поля Грузии, Тбилиси, Мецниереба, 128 с. (Груз.)
5. Ферстер Э., Ренц Б., 1983, Методы корреляционного и регрессионного анализа, М., Финансы и статистика, 303 с.

უკ 551.582

ჰაერის ტემპერატურის მოსალოდნელი ცვლილებები ქ. თბილისში./თავართქილაძე კ., ამირანაშვილი ა./ ჰმი-ს შრომათა კრებული -2008.-ტ.115.-გვ. 57-65.- რუს.; რეზ. ქართ., ინგლ., რუს.

ორი სხვადასხვა მეთოდის გამოყენებით მოყვანილია ჰაერის ტემპერატურის მოსალოდნელი ცვლილებების შეფასება თბილისში 2055 წლამდე.

UDC 551.582

EXPECTED CHANGES OF THE AIR TEMPERATURE IN TBILISI CITY./Tavartkiladze K, Amiranashvili A./ Transactions of the Georgian Institute of Hydrometeorology. -2008. - т.115. – p. 57-65. - Russ.; Summ. Georg.; Eng.; Russ.

The estimation of the expected changes of air temperature in Tbilisi up to 2055 years with the use of two methods is carried out.

УДК 551.582

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В Г. ТБИЛИСИ / Таварткиладзе К.А., Амиранашвили А.Г./Сб.Трудов Института Гидрометеорологии Грузии. –2008. – т.115. – с. 57-65. – Рус.; Рез. Груз., Анг.,Рус.

С использованием двух методов проведена оценка ожидаемых изменений температуры воздуха в Тбилиси до 2055 года.