



УДК 551.583.7:539.1:550.3

© 2007

С. Г. Бойченко

Квазипериодические колебания приземной температуры Северного полушария в последнем тысячелетии

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

The climate of the last millennium is characterized by a weak and practically linear large-scale decrease of the global temperature ($\sim 0.28^\circ\text{C}/10^3$ years), that is connected with a change of the terrestrial orbit eccentricity — the reaction of the terrestrial climatic system on “the orbital signal”. Quasiperiodic fluctuations of the ground temperature on the background of the cooling with the periods of 57 ± 1 and 66 ± 2 years following from the analysis of the available temperature series restored by a non-direct way and those with the period 58 ± 3 years obtained as a result of instrumental observations, practically coincide. The analysis of possible factors of quasi-periodic fluctuations of temperature in the last millennium and in the modern period is carried out.

Исследование особенностей колебаний глобальной приземной температуры в последнем тысячелетии — важная научная задача, решение которой представляет огромный интерес как для целей поиска и обоснования возможных основных физических механизмов, формирующих современные и ожидаемые в ближайшем будущем изменения климата нашей планеты, так и с точки зрения выяснения возможных причин, провоцирующих возникновение и усиление аномальных катастрофических климатических и/или геофизических явлений (землетрясений, засух, паводков, смерчей и т. д.). Понимание того, на каком крупномасштабном фоне происходили в последнем тысячелетии сравнительно мелкомасштабные колебания климата, может, естественно, в определенной мере прояснить и вопрос о возможных причинах современных квазипериодических колебаний глобального климата, развивающихся на фоне общего глобального потепления, спровоцированного, как считают, антропогенным усилением естественного атмосферного парникового эффекта [1].

Эмпирическая модель векового хода среднегодовой приземной температуры Северного полушария в последнем тысячелетии. Для построения этой модели были привлечены достаточно надежные эмпирические ряды аномалий приземной температуры для средних и высоких широт Северного полушария (отклонений температуры от их средних значений для периода 1961–1990 гг.), полученные опосредованным путем известными научными группами исследователей, а именно: Р. Jones, М. Mann, К. Briffa и Т. Crowley

(табл. 1). Эти температурные ряды восстановлены авторами публикаций [2–5] путем анализа изотопных соотношений водорода и кислорода в осадках, а также в пузырьках воздуха, законсервированных, в частности, во льдах полярных регионов планеты.

Основные статистические характеристики анализируемых эмпирических рядов аномалий среднегодовой приземной температуры Северного полушария за период 1000–1850 гг. ($t_0 = 851$ лет) сопоставлены в табл. 1. Как видно из таблицы, приведенные эмпирические ряды обладают некоторыми различиями. Однако несмотря на это, можно все же говорить об определенной качественной надежности опубликованных к настоящему времени оценок динамики температуры в рассматриваемом регионе. В связи с этим целесообразно использовать для анализа и ряд, который может быть получен путем простого арифметического усреднения эмпирических рядов различных групп ученых (так называемый усредненный ряд). К тому же, коэффициент корреляции между каждым из четырех эмпирических рядов и полученным на их основании “усредненным” рядом составляет 70–85%.

Опубликованные эмпирические ряды аномалий температуры в Северном полушарии для периода 1000–1850 гг., а также усредненный ряд можно с достаточной точностью аппроксимировать следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \delta T(t) &\approx x(t), & x(t) &= x_\gamma(t) + x_G(t) + x_L(t) + \varepsilon(t) & \text{при} & \quad 1000 \leq t \leq 1850; \\ x_\gamma(t) &= \langle \delta T(t) \rangle + \gamma \left[(t - t_0) - \frac{\tau}{2} \right], \\ \text{где} \quad t_0 &= 1000 \text{ г.}, & \tau &= 851 \text{ лет}; \\ x_G(t) &= \sum_{(1 \leq k \leq 12)} \left\{ a_k \sin \left[2\pi \frac{t - t_0}{\tau} \right] + b_k \cos \left[2\pi \frac{t - t_0}{\tau} \right] \right\}. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $\langle \delta T \rangle$ — среднее значение аномалий температуры за период 1000–1850 гг.; x_γ — слагаемое, учитывающее влияние линейного тренда температуры с коэффициентом γ ; x_G — ряд Фурье с коэффициентами a_k и b_k , описывающий крупномасштабные колебания температуры (с периодами, превышающими $\tau/12$, т. е., примерно, 70 лет); x_L — слагаемое, описывающее влияние сравнительно мелкомасштабных колебаний (с периодами, меньшими $\tau/12$); ε — случайная (видимо, дельта-коррелированная) функция, учитывающая, как случайные

Таблица 1. Основные статистические характеристики исследуемых эмпирических рядов векового хода приземной температуры Северного полушария для последнего тысячелетия (1000–1850 гг.)

Характеристика	Эмпирический ряд				
	Jones и др., по [2]	Mann и др., по [3]	Briffa и др., по [4]	Crowley и др., по [5]	усред- ненный
Средняя аномалия температуры, °С	–0,317	–0,292	–0,187	–0,264	–0,265
Коэффициент линейного тренда температуры, °С/10 ³ лет	–0,528	–0,169	–0,191	–0,244	–0,283
Среднее квадратическое отклонение эмпирического ряда, °С	0,162	0,132	0,102	0,163	0,107
Среднее квадратическое отклонение от линейного тренда, °С	0,097	0,125	0,019	0,151	0,082
Среднее квадратическое отклонение от линейного тренда + Фурье-ряда с учетом первых 12-ти гармоник, °С	0,054	0,105	0,081	0,135	0,063

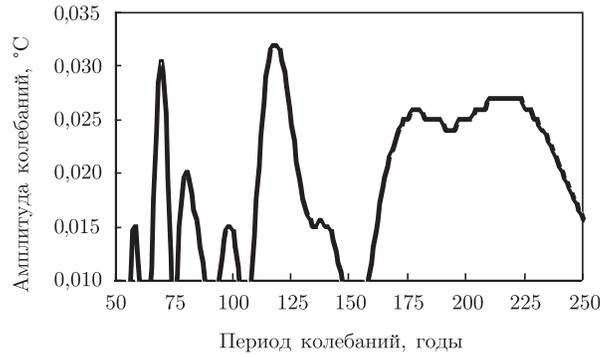


Рис. 1. Спектр динамики приземной температуры в Северном полушарии в последнем тысячелетии (для усредненного ряда)

естественные возмущения, так и случайные ошибки, допущенные при восстановлении температуры в том или ином году; t — номер года; τ — количество лет в рассматриваемом промежутке времени.

Результаты дисперсионного анализа, приведенные в табл. 1, указывают на обоснованность использованного в формуле (1) представления функции δT в виде суперпозиции рассмотренного типа слагаемых.

На рис. 1 приведен участок амплитудного Фурье-спектра (для периода колебаний от 50 до 250 лет) для вариаций отклонений температур от их линейного тренда (т.е. для $\delta_\gamma T = \delta T - x_\gamma$), а на рис. 2 сопоставлены эмпирические данные для усредненного ряда с результатами расчетов функций x_γ и $x_\gamma + x_G$, где для расчета x_G использованы эмпирические значения констант a_k и b_k (см. табл. 2). Как видно из рисунков, в последнем тысячелетии в вековом ходе температуры довольно четко проявилось и монотонное крупномасштабное похолодание (с коэффициентом линейного тренда $0,28 \text{ } ^\circ\text{C}/10^3 \text{ лет}$), и, на его фоне, — несколько долгопериодных квазипериодических колебаний температуры (групп волн) с периодами, практически соответствующими известным долгопериодным ритмам солнечной активности (цикл Глайсберга, де Врие-Дамона и т.д.) [6, 7].

Характерные особенности колебаний глобального климата Земли в последнем тысячелетии. Итак, вековой ход глобальной температуры в последнем тысячелетии, восстановленный различными группами ученых, обладает следующими особенностями:

слабое и практически линейное крупномасштабное снижение глобальной температуры (с темпом $\sim (0,28 \pm 0,07) \text{ } ^\circ\text{C}/10^3 \text{ лет}$), связанное, видимо, с уменьшением эксцентриситета земной орбиты (реакция земной климатической системы на “орбитальный сигнал” [8, 9]);

крупномасштабные квазипериодические колебания температуры, развивающиеся на фоне этого крупномасштабного снижения температуры, а именно: 1) потепление в раннем

Таблица 2. Эмпирические константы Фурье-ряда для соотношения (1) (усредненный ряд)

Параметр, °C	Значение k											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a_k	0,009	-0,005	-0,017	-0,018	0,014	-0,007	0,018	-0,003	0,006	-0,009	0,017	0,023
b_k	0,001	0,037	-0,013	-0,02	-0,019	-0,012	-0,023	0,005	0,011	0,010	-0,003	-0,004
A_k	0,009	0,037	0,021	0,027	0,024	0,014	0,029	0,006	0,012	0,014	0,018	0,024

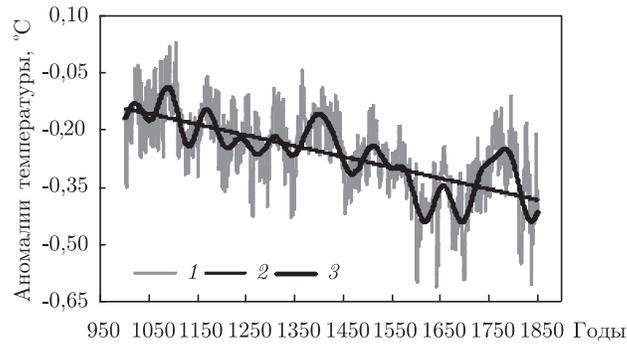


Рис. 2. Вековой ход аномалий среднегодовой приземной температуры в последнем тысячелетии для усредненного ряда:

1 — эмпирические данные; 2 — линейный тренд; 3 — Фурье-аппроксимация (1)

средневековье (малый климатический оптимум), 2) похолодание в позднем средневековье (малый ледниковый период) с двумя несущественными потеплениями [5, 6, 9].

Следует обратить внимание на то, что при рассмотрении возможных физических механизмов формирования климата Земли в последнем тысячелетии следует все же пренебречь возможным влиянием ослабления или усиления атмосферного парникового эффекта, так как вековые колебания основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) в последнем тысячелетии (до 1850 г.) были чрезвычайно малы [1, 5], а поэтому провоцировать наблюдаемые колебания температуры в этот период парниковые газы не могли.

Мелкомасштабные квазипериодические колебания приземной температуры.

При исследовании векового хода глобального термического режима за период 1856–2002 гг. на основе эмпирических рядов среднегодовых температур, полученных путем прямых инструментальных наблюдений и опубликованных IPCC в [1], установлено общее потепление (с коэффициентом линейного тренда $0,50\text{--}0,65$ °C/100 лет), на фоне которого проявились квазипериодические колебания с периодом (58 ± 3) лет неизвестной физической природы [10].

Поэтому также целесообразно было провести спектральный Фурье-анализ рассмотренных тысячелетних температурных рядов (и, в том числе, усредненного ряда) с целью выяснения, существовали ли колебания температур с таким же периодом и на протяжении последнего тысячелетия, или эти колебания проявились лишь в последние ~ 150 лет при ярко выраженном глобальном потеплении климата, которое связывают с антропогенной деятельностью. Для спектрального анализа, с целью уменьшения ошибок и избавления от ложных амплитудных выбросов, рассматривались только модифицированные ряды, полученные путем выделения из первичных рядов слагаемых, описывающих влияние линейных трендов и крупномасштабных квазипериодических колебаний, т. е. ряды

$$\delta_L T(t) = \delta T(t) - [x_\gamma(t) + x_G(t)],$$

где

$$1000 \leq t \leq 1850.$$

На рис. 3 представлен участок спектра рядов $\delta_L T$ для периода колебаний от 50 до 70 лет. Как видно из этого рисунка, четко выделяются два колебания с периодами (57 ± 1)

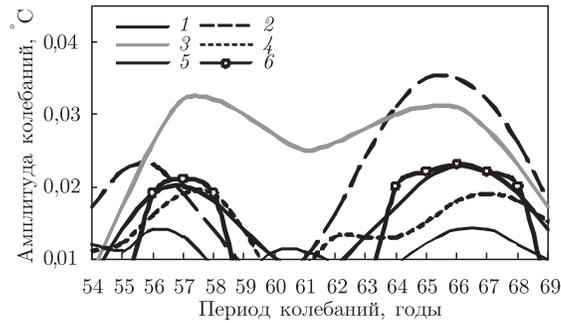


Рис. 3. Участок спектра динамики приземной температуры в Северном полушарии в последнем тысячелетии для периода колебаний около 54–69:

1 — Jones и др., по [2]; 2 — Mann и др., по [3]; 3 — Briffa и др., по [4]; 4 — Crowley, по [5]; 5 — усредненный ряд; 6 — расчет аналогично модели (2)

и (66 ± 2) лет. А это означает, что модифицированный ряд $\delta_L T$ можно аппроксимировать соотношением:

$$\delta_L T(t) \approx x_L(t) = \sum_{(1 \leq i \leq 2)} \left\{ A_i \sin \left[2\pi \frac{t - t_0}{\tau_i} \right] + B_i \cos \left[2\pi \frac{t - t_0}{\tau_i} \right] \right\}, \quad (2)$$

где

$$A_1 \approx -0,012 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad B_1 \approx -0,010 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \tau_1 \approx 57 \pm 1 \text{ лет};$$

$$A_2 \approx -0,013 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad B_2 \approx -0,013 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \tau_2 \approx 66 \pm 2 \text{ лет}.$$

Здесь числовые значения констант приведены для усредненного ряда.

Выявленные при спектральном анализе температурных рядов за период 1000–1850 гг. квазипериодические колебания температуры с периодами (57 ± 1) и (66 ± 2) лет практически соответствуют квазипериодическим колебаниям температуры с периодом (58 ± 3) года, полученным при анализе современных эмпирических рядов инструментальных наблюдений. А это означает, что колебания имеют, по-видимому, одну и ту же физическую природу. Правда, амплитуда колебаний температуры для периода 1000–1850 гг. примерно на порядок ниже амплитуды колебаний для периода 1850–2000 гг., что, возможно, связано со сглаживанием данных посредством обработки опосредованных материалов. С этими же причинами, вероятно, вызвано и “расщепление” периода колебаний на два.

О возможной физической природе квазипериодических колебаний приземной температуры. Квазипериодическое колебание температуры с периодом (58 ± 3) года за последние почти 150 лет проявилось уже дважды [10–12]. Считается, что именно оно и было основной причиной наблюдаемого повышения температуры в 30-е годы XX ст., снижения — в 60-е годы прошлого столетия, а также чрезвычайно сильного роста температуры в последнем десятилетии XX ст. — в начале XXI ст. [13]. Как было показано выше, квазипериодические колебания температуры практически с таким же периодом были выявлены и для последнего тысячелетия. Однако объяснить физическую природу этих колебаний, несмотря на усилия многих научных групп, работающих над этой проблемой, пока окончательно не удалось.

Среди большого количества опубликованных возможных физических механизмов, которые могли бы формировать такого типа квазипериодические колебания температуры, приведем здесь наиболее обоснованные, а именно:

случайное (броуновское) *блуждание земной климатической системы*, обусловленное в основном перестройкой циркуляции глубинных вод Мирового океана [13]. Если справедливо это предположение, то можно считать, что с XIX ст. наблюдалась отдельная реализация такого случайного процесса. Математические модели броуновского блуждания при приведенных условиях действительно могут приводить к подобному результату, но только в случае реализации одного периода волны. Но, как видим, на протяжении последних 150 лет уже реализовались две волны. А это указывает все же на то, что процессы ее формирования имеют детерминированный характер;

квазипериодическая релаксация земной климатической системы к новым условиям нагревания. С физической точки зрения при существовании в земной климатической системе соответствующих прямых и обратных тепловых связей формирования такого типа колебаний температуры возможны, но пока что эти связи мало изучены [13], поэтому надежных результатов об их роли в формировании колебаний климата еще не получено;

ритмы взрывной вулканической деятельности. Доказано, что вулканы при взрывах вводят в стратосферу серные соединения и т. д., которые со временем, путем различных физико-химических преобразований, превращаются *in situ* в серноокислый (или сульфатный) аэрозоль, который может существенно повышать планетарное альbedo. Этот механизм, как показано в работах [13–15], действительно может приводить к колебаниям глобальной температуры, которые наблюдались в XX ст. Следует отметить, что, взрывная вулканическая деятельность на Земле может быть одним из опосредствованных механизмов, благодаря которым иной неизвестный, например, астрономический X-фактор формирует ритмы в климатических и геофизических процессах на Земле;

ритмы активности Солнца (результат Фриис-Христенсена и Ласена [7]), что непосредственно или опосредствованно (причинно-следственная связь) влияют на климатические и геофизические процессы на Земле, или просто играют роль индикатора (индикаторная связь) возможного влияния неизвестного астрономического X-фактора на соответствующие процессы и на Солнце, и на нашей планете;

главный цикл пространственного смещения центра Солнечной системы, когда приблизительно повторяется конфигурация стояния Солнца, Юпитера и Сатурна, от которых и зависит в основном расположение центра инерции Солнечной системы (в этом цикле Солнце движется вокруг центра инерции Солнечной системы по траектории, форма которой приблизительно совпадает с незамкнутым трехлистником и характерный размер которого равен размеру самого Солнца). Как известно, период этого цикла составляет около 60 лет [12]. Этот процесс может приводить как к модуляции ритмов солнечной активности, так и к возможным изменениям потока солнечной энергии к Земле.

Таким образом, путем статистического анализа эмпирических рядов получены оценки, характеризующие особенности колебаний приземной температуры в последнем тысячелетии (до 1850 г.). Показано, что на фоне снижения температуры с темпом $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}/1000$ лет в последнем тысячелетии, которое возможно является реакцией земной климатической системы на снижение эксцентриситета земной орбиты [8], формируются долгопериодные квазипериодические колебания температуры с периодами ~ 100 , (120 ± 10) и (200 ± 25) лет.

Более мелкомасштабные квазипериодические колебания приземной температуры с периодами (57 ± 1) и (66 ± 2) лет, которые проявились в последнем тысячелетии, и колебания современной температуры с периодом (58 ± 3) года, выявленные по материалам инструментальных наблюдений, по-видимому, имеют одну и ту же физическую природу. Скорее всего, доминирующим фактором, формирующим колебания с периодом $\sim 55\text{--}70$ лет является

астрономический фактор — квазипериодические пространственные вариации центра Солнечной системы, связанные, главным образом, с гравитационным взаимодействием Солнца и гигантских планет [5, 6, 14].

Автор выражает благодарность доктору физ.-мат. наук, профессору В. М. Волощуку за ценные консультации при проведении данной работы.

1. *Climate change 2001. – The scientific basis – Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report. – UNEP/WMO, 2001. – 520 p.*
2. *Jones P. D., Briffa K. R., Barnett T. P. and Tett S. F. B. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures // The Holocene. – 1998. – 8. – P. 455–471.*
3. *Mann M. E., Bradley R. S., Hughes M. K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties and limitations // Geophys. Res. Lett. – 1999. – 26. – P. 759–762.*
4. *Briffa K. R., Osborn T. J., Schweingruber F. H. et al. Low-frequency temperature variations from the northern tree-ring-density network // J. Geophys. Res. – 2001. – 106, N D3. – P. 2929–2941.*
5. *Crowley T. J. Causes of climate change over the past 1000 years // Science. – 2000. – 289. – P. 270–277.*
6. *Поток энергии Солнца и его изменения / Под ред. О. Уайта. – Москва: Мир, 1980. – 558 с.*
7. *Long term changes and trends in the atmosphere / Ed. Gufran Beig. – New Age Intern. (P) Limited, Publ., 2000. – 384 p.*
8. *Волощук В. М., Бойченко С. Г. Особенности реакции климатических условий Земли на “орбитальный сигнал” // Доп. НАН України. – 2005. – № 10. – С. 109–113.*
9. *Белевцев Р. Я., Бойченко С. Г., Волощук В. М. Колебания приземной температуры Северного полушария в последнем тысячелетии и возможные физические причины их формирования // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2005. – № 4. – С. 53–62.*
10. *Бойченко С. Г., Волощук В. М. Основные закономерности современной динамики глобального температурного режима тропосферы // Доп. НАН України. – 2006. – № 5. – С. 104–110.*
11. *Даценко Н. М., Монин А. С., Берестов А. А. и др. О колебаниях глобального климата за последние 150 лет // Докл. АН. – 2004. – 339, № 2. – С. 253–256.*
12. *Монин А. М., Берестов А. А. Новое о климате // Вестн. РАН. – 2005. – 75, № 2. – С. 126–138.*
13. *Винников К. Я. Чувствительность климата. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1986. – 223 с.*
14. *Weber S. L. A timescale analysis of the northern hemisphere temperature response to volcanic and solar forcing // Climate of the Past. – 2005. – No 1. – P. 9–17.*
15. *The State of the planet: frontiers and challenger in geophysics / Ed. by R. Stepen, J. Sparks and C. Hawkesworth. – Washington, DC: Amer. Geophys. Union, 2004. – 410 p.*

*Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 05.12.2006