
ПРИРОДА И ОБЩЕСТВО

В. В. КЛИМЕНКО, О. В. МИКУШИНА

НЕОБЫЧНАЯ ДИНАМИКА ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В НАЧАЛЕ XXI в.: ЕСТЕСТВЕННЫЕ ФАКТОРЫ ПРОТИВ АНТРОПОГЕННЫХ*

Установлено, что наблюдаемое в последние 10 лет замедление глобального потепления вызвано противодействием естественных факторов, в первую очередь снижением солнечной активности и переходом Североатлантического колебания в очередную отрицательную фазу. Предполагается, что потепление возобновится в ближайшие годы, но с меньшими, чем в последние 30 лет, скоростями.

Ключевые слова: глобальное потепление, антропогенные и естественные факторы, спектральный анализ.

Первая декада нынешнего столетия завершилась весьма неординарным климатическим событием – впервые за последние 65 лет среднеглобальная за пятилетие (2006–2010 гг.) температура оказалась ниже температуры предыдущего пятилетия (2001–2005 гг.). Кроме того, уже тринадцать лет кряду абсолютный максимум температуры, достигнутый еще в 1998 г., остается непревзойденным. Оба отмеченных факта как будто укрепляют аргументацию противников теории глобального потепления, во всяком случае тех, кто считает антропогенную версию этого потепления неоднозначной или вообще надуманной. Ведь за последние 30 лет антропогенная эмиссия диоксида углерода, основного парникового компонента атмосферы, выросла на 60 % – с 5,2 до 8,5 млрд тонн углерода в год, а концентрация CO₂ – с 339 до 390 млн⁻¹. Как в этом случае объяснить видимое замедление скорости глобального потепления?

* Исследование проводилось по гранту РФФИ 11-06-00143.

Совершенно очевидно, что наблюдаемое глобальное повышение температуры (рис. 1) является результатом совместного воздействия на климатическую систему не только антропогенных, но и естественных факторов. Некоторые из последних и являются причиной современного климатического парадокса. Ниже мы попытаемся идентифицировать данные факторы и на основе этого анализа дать прогноз развития климатической ситуации в мире на ближайшие десятилетия.

Мировое научное сообщество склоняется к мнению, что обусловленное деятельностью человека возрастание концентраций парниковых газов (в первую очередь диоксида углерода и метана) является главной причиной зафиксированного в последние 100 лет потепления (Climate... 2007). Гораздо менее определенной видится сейчас роль естественных факторов (Солнца, вулканов, скорости вращения Земли, циркуляционных характеристик атмосферы) не только в достигнутом потеплении, но и в периодически возникающих стагнациях температуры различного масштаба и продолжительности (рис. 1). Сейчас мы имеем дело с очередной подобной стагнацией, тем более заслуживающей внимания, поскольку недавние прогнозы, выполненные с помощью широкого спектра климатических моделей, вполне определенно указывали на **возрастание** скорости потепления в начале нынешнего столетия (*Ibid.*; Climate... 2001).

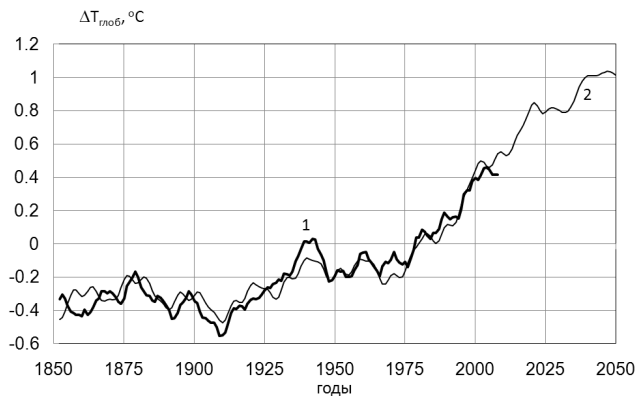


Рис. 1. Хронология изменения глобальной температуры в 1850–2050 гг. (в отклонениях от среднего за 1961–1990 гг.): 1 – данные CRU (см.: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>) (Brohan *et al.* 2006); 2 – расчеты: антропогенный тренд, дополненный доминирующими гармониками 69, 21 и 9 лет (до 2025 г. также 6 лет)

Спектральный анализ температурных данных

На рис. 2 представлены результаты непрерывного вейвлетного анализа рядов глобальной и полушарных среднегодовых температур за 1850–2011 гг. Следует подчеркнуть, что возможность анализа столь продолжительных рядов появилась лишь относительно недавно, в основном в результате значительного продвижения их начальной точки в прошлое, что делает реальным поиск в них мультидекадных ритмов. Из рядов предварительно были удалены долгопериодные антропогенные тренды, вызванные накоплением парниковых газов и аэрозолей в атмосфере. Тренды определялись расчетами на энергобалансовой модели климата МЭИ (Клименко и др. 1997). Полученные таким образом температурные ряды с удаленным трендом должны содержать важную информацию о влиянии естественных факторов.

Вейвлет-преобразования W исследуемых температурных рядов длины $N = 162$ были вычислены в Фурье-пространстве на основе вейвлета Морле с параметром $\omega_0 = 6,0$ (Torrence, Compo 1998); энергетические вейвлет-спектры $|W|^2$ были нормированы на величину $1/\sigma^2$, где σ^2 – дисперсия соответствующего ряда. Наибольшие значения мощности вейвлет-спектров на рис. 2 соответствуют временным масштабам порядка 60–70 лет и находятся на границе так называемого конуса влияния краевых условий (Там же). Именно в области больших временных масштабов лежат возмущения, вносимые неоднородностью, которая при расчете вейвлет-преобразования W появляется в результате заполнения нулями дополнительных позиций вблизи границ исходного временного ряда. Однако, как известно, такая неоднородность может привести только к уменьшению амплитуды W вблизи границ (Там же), и, следовательно, в данном конкретном случае не изменит общую картину расположения максимумов. При этом наибольшие значения мощности спектра лежат внутри 95%-ных областей достоверности, рассчитанных в предположениях, что случайная составляющая является гауссовым белым шумом или красным шумом с коэффициентом автокорреляции при единичном шаге запаздывания $\alpha = 0,6$.

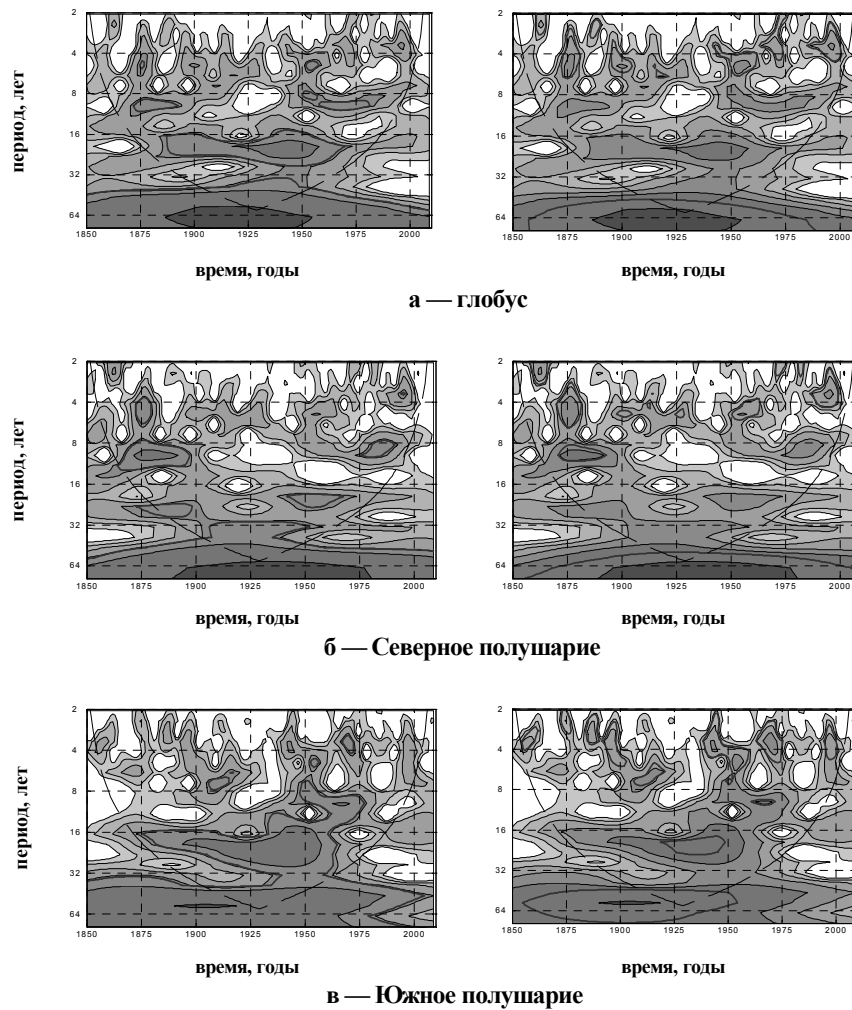


Рис. 2. Локальные энергетические вейвлет-спектры рядов глобальной (а) и полушарных (б, в) температур. Жирные линии отмечают границы 90%-ной области достоверности относительно гауссова белого шума (слева) и красного шума с коэффициентом автокорреляции при единичном шаге запаздывания $\alpha = 0,6$ (справа). Штриховой линией показан конус влияния краевых условий. Затемненные контуры соответствуют уровням мощности спектра 0,25, 0,5, 1, 2, 4 и 16

На рис. 2 в виде контурных линий показаны 90 %-ные уровни достоверности относительно гауссова белого шума (слева) и красного шума с $\alpha = 0,6$ (справа). Области превышения 90 %-ного уровня относительно белого шума имеются вблизи временных масштабов около 9 лет (в 1870–1890 гг. и 1960–1980 гг. – для глобальной температуры, в 1860–1890 гг. и 1975–1990 гг. – для температуры Северного полушария, в 1950–1975 гг. – для температуры Южного полушария), а также около 20 лет (в 1885–1970 гг. – для глобальной температуры, в 1875–1900 гг. и 1940–1965 гг. – для температуры Северного полушария, в 1875–1960 гг. – для температуры Южного полушария). В течение почти всего интервала наблюдений колебания на временных масштабах в диапазоне 2–7 лет превышали 90 %-ный уровень, рассчитанный для красного шума с коэффициентом автокорреляции $\alpha = 0,6$. В 1870–1890 гг. существовали изолированные области вейвлетного спектра температуры Северного полушария, а в 1960–1970 гг. – температуры Южного полушария, в которых имеет место превышение 90 %-ного уровня относительно красного шума примерно вблизи 9-летнего масштаба вейвлет-преобразования.

Таким образом, данные на рис. 2 показывают наличие весьма устойчивых для глобуса примерно 70-летнего и 20-летнего циклов за все время инструментальных наблюдений с середины XIX в.; 9-летний цикл наблюдался в большей части (1870–1900 гг. и 1940–2000 гг.) общего периода наблюдений. Кроме того, в значительной части интервала наблюдений имелись колебания в диапазоне от 2 до 7 лет.

Похожие результаты были получены при исследовании нормализованных температурных рядов методом максимальной энтропии (МЕМ) (рис. 3). Оценка спектров МЕМ была выполнена на основе известного алгоритма Бурга, формализация которого содержится в работе (Andersen 1974). Анализ проводился для 162 точек каждого ряда и включал фильтры размерности 54. Размерность соответствующей AR модели была выбрана равной 1/3 длины исследуемого ряда, что в соответствии с многолетним опытом использования МЕМ в климатических исследованиях позволяет делать полезные выводы (Schönwiese 1992). Увеличение размерности приводит к расщеплению 70-летнего максимума на два пика с периодами около 60 и 100 лет (рис. 4).

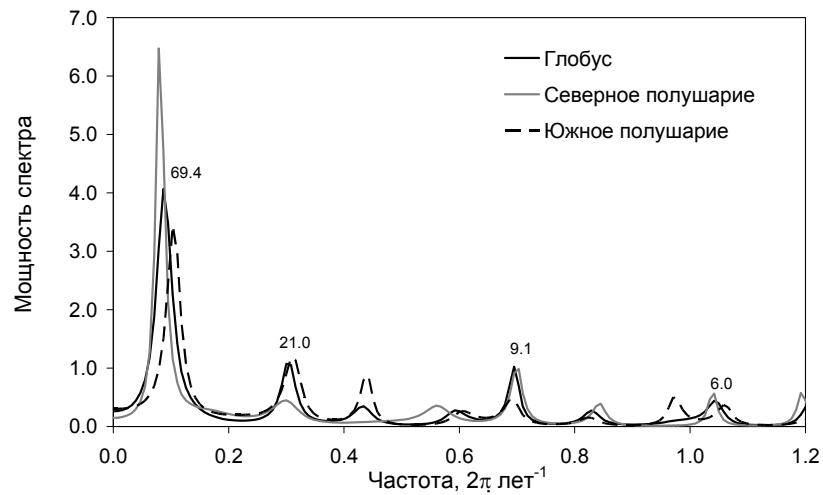


Рис. 3. Спектральные оценки рядов глобальной и полушарных температур, вычисленные по методу максимальной энтропии. Подписаны значения периодов для максимумов мощности спектра глобальной температуры

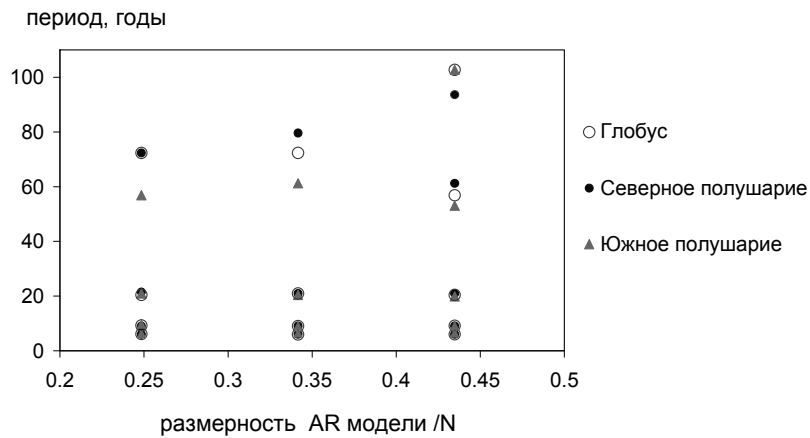


Рис. 4. Основные периоды, выделенные в рядах глобальной и полушарных температур с помощью метода максимальной энтропии

Результаты и выводы

Мы полагаем, что источником доминирующей 70-летней гармонии является Северная Атлантика, где она уверенно фиксируется не только в океане (Schlesinger, Ramankutty 1994; Sique *et al.* 2008; Meeker, Mayewski 2002), но и на континентальной периферии: в Гренландии (Stuiver *et al.* 1995), Северной Америке (Minobe 1997), Англии (Benner 1999), Финляндии (Ogurtsov *et al.* 2005), на Новой Земле и Ямале (Клименко 2007), причем не только в инструментальных данных, но и в рядах палеотемператур и давления продолжительностью в сотни и даже тысячи лет. Мы полагаем, что этот ритм обусловлен квазипериодическим изменением атмосферной и океанической циркуляции, известным как Североатлантическое колебание (NAO) (Hurrell 1995), и связанными с ним пульсациями притока теплых вод в бассейны Норвежского и Баренцева морей.

Интересно, что 70-летний ритм отмечен в рядах глобальной температуры и в еще большей степени – температуры Северного полушария, но он едва заметен в спектре Южного полушария (рис. 2–3), что является важным свидетельством в пользу его североатлантического происхождения.

Наличие бидекадного цикла часто приписывают влиянию Солнца, но здесь не все так просто, поскольку в нашем случае этот цикл почти не выражен в Северном полушарии, зато отчетливо виден в Южном (рис. 3). Это заставляет искать его вероятное происхождение не только в поведении Солнца, но и в динамике Южного колебания (SO), индекс которого имеет пик в 22 года (Dovgalyuk, Klimenko 1996; Schneider, Schönwiese 1989). Последняя версия подтверждается тем, что температурные ряды экваториальной и южной частей Тихого океана, а также всей акватории Индийского океана содержат выраженную бидекадную осцилляцию (Schlesinger, Ramankutty 1994). В свою очередь Южное колебание, в значительной мере определяющее температурный режим Южного полушария, несомненно, испытывает влияние колебаний скорости вращения Земли, также имеющих важный период в 22 года (Сидоренков 2002).

Природа 9-летнего цикла представляется в настоящее время наименее ясной и видится нам результатом сложения колебаний

лунно-солнечных приливов с характерными временами в 8,85 (период перигея лунной орбиты) и 9,86 года (период барицентра системы Солнце – Юпитер), несомненно, способных вызывать значительные изменения атмосферной циркуляции и, следовательно, температуры воздуха.

Сравнение данных инструментальных наблюдений с 1850 г. с результатами расчетов на энергобалансовой модели, дополненной суперпозицией нескольких основных выявленных циклов, представлено на рис. 1. Расчетная кривая на участке 1890–2011 гг. объясняет более 75 % наблюдаемой изменчивости и ясно демонстрирует, что естественные факторы в значительной мере могут усиливать или, напротив, маскировать развивающееся потепление вплоть до его полной остановки или даже кратковременного похолодания, как это имеет место в последние 6–8 лет.

Для прогнозирования климатической обстановки будущего помимо идентификации основных естественных факторов необходима корректная экстраполяция антропогенно обусловленного изменения температуры. Здесь величина антропогенного тренда вычислялась на основе наших представлений об эволюции мировой энергетики и эмиссии парниковых газов в атмосферу, подробно изложенных в недавней работе (Клименко, Терешин 2010). Согласно этим представлениям в ближайшие десятилетия следует ожидать существенного снижения темпов роста производства энергии в мире и эмиссии диоксида углерода в атмосферу в результате насыщения персональных потребностей в энергии, ожидаемой стабилизации численности населения и постоянного сокращения сферы использования органических видов топлива. В соответствии с нашим базовым прогнозом (Там же) концентрация диоксида углерода в атмосфере должна составить (453 ± 6) млн⁻¹ к середине столетия против 391 млн⁻¹ в настоящее время.

Результаты расчетов показывают, что в ближайшие годы потепление возобновится (рис. 1), но его скорости вплоть до середины и, вероятно, конца столетия будут ниже достигнутых в период 1975–2005 гг., когда совпадение чрезвычайно интенсивных положительных фаз NAO и SO с рекордными за последние 600 лет уровнями солнечной радиации (Steinhilber *et al.* 2009) обеспечивало

скорости потепления, превышающие $0,2^{\circ}\text{C}$ за декаду. В ближайшие десятилетия естественные факторы будут оказывать сдерживающее воздействие на процесс глобального потепления, что будет связано в первую очередь со снижением солнечной активности и переходом NAO в отрицательную фазу, для которой характерно ослабление интенсивности западного переноса воздушных масс. Как показывают данные недавних наблюдений, оба указанных процесса набирают силу. В самом деле, индекс NAO неуклонно снижается с начала 1990-х гг. и сейчас находится на самом низком за последние 40 лет уровне (см.: <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html>). Одновременно с этим в текущем 24-м солнечном цикле, начавшемся летом 2008 г., зафиксированы минимальные за всю 33-летнюю историю спутниковых наблюдений значения солнечной постоянной (см.: <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>).

Литература

Клименко, В. В. 2007. Комплексная реконструкция климата Российской Арктики в XV–XX вв. *Вестник МГУ. Серия 5. География* 6: 16–24.

Клименко, В. В., Клименко, А. В., Андрейченко, Т. Н. и др. 1997. *Энергия, природа и климат*. М.: Изд-во МЭИ.

Клименко, В. В., Терешин, А. Г. 2010. Мировая энергетика и глобальный климат после 2100 г. *Теплоэнергетика* 12: 38–44.

Сидоренков, Н. С. 2002. *Физика неустойчивостей вращения Земли*. М.: Наука; Физматлит.

Andersen, V. 1974. On the Calculation of Filter Coefficients for Maximum Entropy Spectral Analysis. *Geophysics* 39(1): 69–72.

Benner, T. C. 1999. Central England Temperatures: Long-term Variability and Teleconnections. *International Journal of Climatology* 19(4): 391–403.

Brohan, P., Kennedy, J. J., Harris, I. et al. 2006. Uncertainty Estimates in Regional and Global Observed Temperature Changes: a New Dataset from 1850. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111, No. D12106, doi:10.1029/2005JD006548.

Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

Climate Change / ed. by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

Dovgalyuk, V. V., Klimenko, V. V. 1996. On Long-term Variations in the Intensity of El Niño Occurrences. *Geophysical Research Letters* 23(25): 3771–3774.

Hurrell, J. W. 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science* 269(5224): 676–679.

Meeker, L. D., Mayewski, P. A. 2002. A 1400-year High-Resolution Record of Atmospheric Circulation over the North Atlantic and Asia. *Holocene* 12(3): 257–266.

Minobe, S. 1997. A 50–70 year Climatic Oscillation over the North Pacific and North America. *Geophysical Research Letters* 24: 683–686.

Ogurtsov, M., Helama, S., Eronen, M., Lindholm, M. 2005. Centennial-to-Millennial Fluctuations in July Temperatures in North Finland as Recorded by Timberline Tree Rings of Scots Pine. *Quaternary Research* 63(2): 182–188.

Schlesinger, M. E., Ramankutty, N. 1994. An Oscillation in the Global Climate System of Period 65–70 years. *Nature* 367(6465): 723–726.

Schneider, V., Schönwiese, C.-D. 1989. Some Statistical Characteristics of the El Niño/Southern Oscillation and North Atlantic Oscillation Indices. *Atmosfera* 2(3): 167–180.

Schönwiese, C.-D. 1992. *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Berlin; Stuttgart: Bornträger.

Sicre, M.-A., Yiou, P., Eiriksson, J. et al. 2008. A 4500-year Reconstruction of Sea Surface Temperature Variability at Decadal Time-scales off North Iceland. *Quaternary Science Reviews* 27(21–22): 2041–2047.

Steinhilber, E., Beer, J., Fröhlich, C. 2009. Total Solar Irradiance During the Holocene. *Geophysical Research Letters* Vol. 36. L19704, doi:10.1029/2009GI040142.

Stuiver, M., Grootes, P. M., Braziunas, T. F. 1995. The GISP 2 $\delta^{18}\text{O}$ Climate Record of the Past 16,500 Years and the Role of the Sun, Ocean, and Volcanoes. *Quaternary Research* 44(3): 341–354.

Torrence, C., Compo, G. P. 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78(1): 61–78.