

УДК 519.71:551.583

ВЛИЯНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ И ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА СПЕКТР МОЩНОСТИ ФЛУКТУАЦИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ ПРОЕКТА CMIP5 И МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

© 2022 г. С. А. Солдатенко^а *, Р. А. Колман^б **

^аСанкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН,
14 линия, дом 39, Санкт-Петербург, 199178 Россия

^бАвстралийское бюро метеорологии, Мельбурн, Виктория, 3008 Австралия

*e-mail: soldatenko@iias.spb.su

**e-mail: robert.colman@bom.gov.au

Поступила в редакцию 15.08.2021 г.

После доработки 24.09.2021 г.

Принята к публикации 07.10.2021 г.

Наблюдаемое изменение климата характеризуется долгосрочными трендами, вызванными, в основном, деятельностью человека, и периодической и аperiodической изменчивостью, обусловленной до конца не изученными естественными факторами. В статье рассмотрено влияние неопределенностей, присущих обратным связям и термической инерции климатической системы, на спектр мощности флуктуаций аномалий глобальноосредненной приповерхностной температуры воздуха (ГТВ). Основной инструмент исследования – стохастическая двухбоксовая энергобалансовая модель (ЭБМ). Оценка влияния неопределенностей обратных связей и термической инерции климатической системы на спектр мощности флуктуаций ГТВ выполнена с помощью функций чувствительности. Показано, что в высокочастотном диапазоне спектра влияние инерции климатической системы превосходит влияние обратных связей. В низкочастотном диапазоне, напротив, влияние обратных связей на спектр мощности превышает влияние климатической инерции. Теоретически полученный спектр мощности флуктуаций ГТВ находится в удовлетворительном согласии с аналогичным спектром, рассчитанным по данным ансамбля моделей проекта CMIP5, что указывает на практическую значимость полученных в статье результатов.

Ключевые слова: изменение климата, изменчивость климата, обратные связи, тепловая инерция, спектр мощности

DOI: 10.31857/S0002351522020109

ВВЕДЕНИЕ

Модели климата, от относительно простых до чрезвычайно сложных совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана, являются основным, если не единственным, инструментом теоретических исследований климатической системы и ее эволюции под влиянием природных и антропогенных факторов. Модели климата позволяют прогнозировать будущее и реконструировать прошлые состояния земной климатической системы (ЗКС), а также исследовать теоретические гипотезы, лежащие в основе различных концепций изменения и изменчивости климата, включая оценку роли антропогенных воздействий в этих процессах. В прошлом климат Земли неоднократно менялся, когда периоды похолодания неодно-

кратно сменялись периодами потепления [1], что было вызвано различными внутренними и внешними причинами, такими как изменения солнечной активности, вариации орбиты и оси Земли, смещение континентов и океанов и изменение их размеров, извержения вулканов и ряд других факторов. Однако текущее изменение климата, в отличие от всех предыдущих, вызвано, во-первых, деятельностью человека и, во-вторых, его темпы и масштабы беспрецедентны [2]. Важно отметить, что современное изменение климата характеризуется не только долгосрочным трендом, вызванным, главным образом, деятельностью человека, но также периодической и аperiodической изменчивостью, обусловленной естественными факторами. Хорошо известно, что для естественной изменчивости климата характерен широкий

диапазон пространственных и временных масштабов [3]. Понимание процессов, которые обуславливают изменение и изменчивость климата, имеет большое значение для разработки стратегий глобального социально-экономического развития, помогая политикам и научному сообществу, работающим над мерами по климатической адаптации, справиться с последствиями изменения климата [4].

В этой связи климатические модели остаются важным инструментом для количественной оценки изменения и изменчивости климата. Однако прогнозы изменения климата, полученные с помощью различных моделей для конкретных сценариев эмиссий парниковых газов, характеризуются довольно большими неопределенностями [5, 6], возникающими в основном из-за межмодельных различий в описании обратных связей в ЗКС [7]. Между тем оценки изменчивости климата, полученные с помощью различных моделей ЗКС, характеризуются еще большей степенью неопределенности. Например, как показано в [8], декадные дисперсии глобальной и полушарных температур, рассчитанные с помощью моделей, принявших участие в 5-й фазе международного проекта по сравнению совместных моделей (CMIP5), отличаются друг от друга более чем в четыре раза. Причина такого несоответствия до сих пор не ясна.

Это отрывок статьи “Effects of Climate System Feedbacks and Inertia on Surface Temperature Power Spectrum Obtained from CMIP5 and Low-Order Models”, полный текст опубликован в “Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics”, 2021, Vol. 57, No. 6, pp. 659–668. DOI: 10.1134/S0001433821200044.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bradley R.* Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary. Oxford: Elsevier, 2015. 696 p.
2. *IPCC 2013: Climate Change 2013: The physical science basis.* Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Edited by Stocker T.F. et al. // Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013. 1535 p.
3. *Kirtman B., Power S.B., Adedoyin J.A. et al.* Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. (eds.)], 2013. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY.
4. *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report.* Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
5. *Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichefet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A.J., Wehner M.* Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Doschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, Eds., 2013. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1029–1136 p.
6. *Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.-C.* Global Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.), 2007. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007, 747–845 p.
7. *Flato G., Marotzke J., Abiodun B., Braconnot P., Chou S.C., Collins W., Cox P., Driouech F., Emori S., Eyring V., Forest C., Gleckler P., Guilyardi E., Jakob C., Kattsov V., Reason C., Rummukainen M.* Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Doschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, Eds., 2013. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 741–866 p.
8. *Colman R.A., Power S.B.* What can decadal variability tell us about climate feedbacks and sensitivity? // *Clim. Dyn.* 2018. V. 51. P. 3815–3828.
9. *Soldatenko S., Colman R.* Climate variability from annual to multi-decadal timescales in a two-layer stochastic energy balance model: analytic solutions and implications for general circulation models // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* 2019. V. 71. 1554421.
10. *Colman R., Soldatenko S.* Understanding the links between climate feedbacks, variability and change using a two-layer energy balance model // *Clim. Dyn.* 2020. V. 54. P. 3441–3459.
11. *Soldatenko S.A., Yusupov R.M.* Estimating the influence of thermal inertia and feedbacks in the atmosphere–ocean system on the variability of the global surface air temperature // *Atmospheric and Oceanic Physics.* 2019. V. 55. № 6. P. 591–601.
12. *Gregory J.M.* Vertical heat transport in the ocean and their effect on time-dependent climate change // *Clim. Dyn.* 2000. V. 16. P. 501–515.
13. *Geoffroy O., Saint-Martin D., Olivie D.J.L., Voldoire A., Bellon G., Tytca S.* Transient climate response in a two-layer energy-balance model. Part I: Analytical solution and parameter calibration using representation of the efficacy of deep-ocean heat uptake and validation

- for CMIP5 AOGCMs // *J. Clim.* 2013. V. 26. P. 1841–1857.
14. *Klyatskin V.I.* Lectures on dynamics of stochastic systems. Amsterdam: Elsevier, 2010. 410 p.
 15. *Gardiner C.* Stochastic methods: A handbook for the natural and social sciences. 4th ed. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 447 p.
 16. *Soldatenko S.A., Chichkine D.* Climate model sensitivity with respect to parameters and external forcing. In: Topics in Climate Modelling. *Hromadka T., Rao P.*, Eds., Rijeka: InTech Publ., 2016. P. 105–135.
 17. *Roe G.* Feedbacks, timescales, and seeing red // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2009. V. 37. P. 93–115.
 18. *Leith C.E.* The standard error of time-average estimates of climate means // *J. Appl. Meteorol.* 1973. V. 12. P. 1066–1069.
 19. *Demchenko P.F., Semenov V.A.* Estimation of uncertainty in surface air temperature climatic trends related to the internal dynamics of the atmosphere // *Dokl. Earth Sci.* 2017. V. 476(1). P. 1105–1108.
 20. *Pelletier J.D.* The power spectral density of atmospheric temperature from time scales of to yr. // *Earth and Planetary Sci. Lett.* 1998. V. 158. P. 157–164.
 21. *Zhu F., Emile-Geay J., McKay N.P., Hakim G.J., Khider D., Ault T.R., Steig E.J., Dee, S., Kirchner J.W.* Climate models can correctly simulate the continuum of global-average temperature variability // *PNAS.* 2019. V. 116. P. 8728–8733.
 22. *Rypdal M., Rypdal K.* Long-memory effects in linear response models of Earth's temperature and implications for future global warming // *J. Clim.* 2014. V. 27. P. 5240–5258.
 23. *Fredriksen H., Rypdal K.* Spectral characteristics of instrumental and climate model surface temperatures // *J. Clim.* 2016. V. 29. P. 1253–1268.
 24. *Bony S., Colman R., Kattsov V.M., Allan R.P., Bretherton C.S., Dufresne J.L., Hall A., Hallegatte S., Holland M.M., Ingram W., Randall D.A.* How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? // *J. Clim.* 2006. V. 19. 3445–3482.

Effects of Climate System Feedbacks and Inertia on Surface Temperature Power Spectrum Obtained from CMIP5 and Low-Order Models

S. A. Soldatenko^{1, *} and R. A. Colman^{2, **}

¹ *St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178 Russia*

² *Australian Bureau of Meteorology, Melbourne, Victoria, 3008 Australia*

*e-mail: soldatenko@ias.spb.su

**e-mail: Robert.colman@bom.gov.au

The current climate change is characterized by both long-term trends caused mainly by human activities and periodic and aperiodic variability caused by natural factors, which are not completely understood. Understanding the processes, that control climate change and variability, is essential from both theoretical and practical points of view. This paper aims at studying the effect of uncertainties in radiative feedbacks and climate system inertia on power spectrum of the global mean surface temperature (GMST) fluctuations. Randomly forced two-box energy balance model (EBM) is used as a main tool of this study. Sensitivity analysis is applied to determine how uncertainties in feedback and climate system inertia affect the power spectrum using the EBM. It was shown that in the high-frequency range of the power spectrum of GMST fluctuations, the influence of climate system inertia is more significant than the influence of feedbacks. In the low-frequency range, on the contrary, the influence of feedbacks on power spectrum exceeds the influence of climate inertia. Our confidence in the results obtained is based on the satisfactory agreement between the theoretical power spectrum derived from the EBM and the power spectrum obtained from observations and coupled climate models, including historical runs of the CMIP5 models.

Keywords: climate change, climate variability, radiative feedbacks, climate system inertia, power spectrum