

А.Б. Полонский, Д.В. Башарин, Г. Станкинавичус*

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь
Вильнюсский Университет, г. Вильнюс

**СРАВНЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИЗЕМНОЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И
РЕЗУЛЬТАТАМ КЛИМАТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ:
РЕГИОНАЛЬНЫЙ И ГЛОБАЛЬНЫЙ МАСШТАБ**

Настоящая работа посвящена сравнению климатической изменчивости приземной температуры воздуха (ПТВ) по данным наблюдений, реанализов (*NCEP, JRA-25*) с прогностическими результатами расчетов для 1948 – 2000 гг. и с климатическим проекциями на 2000 – 2030 гг. Использовались результаты расчетов в рамках совместных глобальных моделей океана-атмосферы (*HadCM3, MIROC3.2H, ECHAM5, GFDL CM2.1.*) по сценарию *A1B*. Подтверждено, что на глобальном масштабе рассматриваемые модели не способны адекватно воспроизводить основные пространственно-временные моды изменчивости приземной температуры воздуха. Межгодовые флуктуации ПТВ на территории Украины климатическими моделями также воспроизводятся плохо. Максимальные коэффициенты корреляции между расчетными и данными наблюдений на метеостанциях не превышают 0,3. При моделировании регионального климата Украины тенденции изменения поля приземной температуры воздуха несколько лучше других воспроизводятся моделью *HadCM3*.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *совместные глобальные модели океана-атмосферы, проект СМIP3, изменчивость температуры воздуха, моделирование климата.*

Введение.

В условиях глобального потепления все более актуальным становится создание глобальных и региональных климатических моделей, способных воспроизводить наблюдаемые тенденции изменения климата и адекватно прогнозировать их. Тенденции в поле приземной температуры воздуха (ПТВ) привлекают к себе особое внимание. Мировые климатические центры развивают модели, потенциально способные воспроизвести наблюдаемые флуктуации ПТВ на масштабах от нескольких лет до нескольких столетий. Однако опубликованные результаты сравнения контрольных прогностических экспериментов с данными наблюдений не дают однозначного ответа о качестве прогностических расчетов.

В рамках проекта *СМIP3* (<http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/>) были собраны результаты прогностических расчетов климата XX века, а также расчеты проекций климата XXI века по 23 глобальным моделям для различных сценариев выбросов парниковых газов до 2100 г. Результаты этого проекта использовались при составлении 4-го отчета экспертов по изменению глобального климата [1]. Они показали, что большинство моделей правильно отображают климатическое распределение ПТВ на глобальном масштабе и дают среднегодовой глобальный тренд ПТВ, соответствующий наблюдениям [2]. Что касается межгодовой-декадной изменчивости на глобальном масштабе, то сравнение про-

гностических расчетов климата XX века показывает, что пространственные моды гидрометеорологических полей более или менее хорошо воспроизводятся отдельными моделями [3]. Однако по поводу временной структуры соответствующих пространственных мод существуют противоположные мнения. Одни результаты говорят, что временной ход ПТВ отдельных мод не воспроизводятся современными моделями общей циркуляции атмосферы и океана [4]. Другие свидетельствуют о возможности выделения временных флюктуаций межгодового-декадного масштаба, близких к наблюдаемым [3]. Поэтому этот вопрос нуждается в дополнительном анализе.

На региональном масштабе некоторые совместные модели океана-атмосферы неплохо воспроизводят климатическую изменчивость в тропических регионах [5]. Для средних широт – результаты намного хуже [6, 7]. В работе [8], в которой анализируется качество моделей для территории России, показано, что результаты во многом зависят от площади регионального осреднения: климатическая изменчивость в каждой отдельно взятой точке воспроизводится намного хуже, чем при осреднении по региону.

Для региона Украины в литературе нет достаточных сведений для понимания того, насколько результаты модельных расчетов климата XX века соответствуют реальной климатической изменчивости за этот период. Нами была проведена такая работа для моделей *GFDL-CM2.1*, *MRI-CGCM* и *UKMO-Had GEM1*. Было показано, что только модель *GFDL-CM2.1* способна воспроизводить правильный знак линейного тренда в январе и июле для региона Украины. При этом аномалии приземной температуры, рассчитанные по рассматриваемым климатическим моделям и данным наблюдений на метеостанциях на территории Украины, плохо коррелируют друг с другом (коэффициент корреляции менее 0,3).

Известно, что существуют другие модели (такие как *UKMO-HadCM3*, *MIROC3.2H* и *MPI_ECHAM5*), которые хорошо себя зарекомендовали при воспроизведении межгодовой изменчивости явления Эль-Ниньо-Южное колебание в регионе Тихого океана [9]. Причем эти модели относительно хорошо воспроизводят изменения климата России в XX веке [7]. Исходя из этого, в настоящей работе проведен дополнительный анализ качества воспроизведения глобальных и региональных климатических изменений для моделей *UKMO-HadCM3*, *MIROC3.2H*, *MPI_ECHAM5*, *GFDL-CM2.1*.

Характеристика использованных данных и методика их обработки.

В данной работе использованы среднемесячные данные наблюдений о поле приземной температуры воздуха (ПТВ) из массива *CRU* (за период 1948 – 2000 гг., проинтерполированные в узлы регулярной сетки $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, <http://www.cru.uea.ac.uk>) [9], реанализов *JRA-25* (за период 2000 – 2010 гг., сетка $1,25^\circ \times 1,25^\circ$, <http://ds.data.jma.go.jp>) и *NCEP* (за период 1948 – 2000 гг., сетка $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>). Эти данные сравнивались с прогнозными результатами расчетов для второй половины XX века (за период 1948 – 2000 гг.) и моделированием климатических проекции для XXI века (2000 – 2010 гг.) в рамках сценария *A1B*. Использовались результаты расчетов по следующим моделям: *HadCM3*, *MIROC3.2H*, *ECHAM5* и *GFDL-CM2.1* с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$. Более полное описание используемых моделей приведено на сайте <http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/>. На региональном масштабе анализиро-

валась также изменчивость температуры в районе трех станций (Львова, Одессы и Полтавы), расположенных в разных частях Украины.

Для выделения глобальных пространственно-временных структур исходный массив данных анализировался с помощью метода эмпирических ортогональных функций (ЭОФ). Впервые для статистического прогноза в метеорологии этот метод был предложен Лоренцом. Он часто применяется для обработки данных на регулярной сетке [10]. Метод состоит в разложении начального поля $F(x, t)$ по некоторым функциям $X_n(x)$ с коэффициентами $T_n(t)$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), изменяющимися от одного поля к другому ($F(x, t) = \sum (T_n(t) * X_n(x))$). При этом, в основу определения неизвестных функций ставится лишь одно условие: сумма квадратов ошибок разложения по всем точкам данной совокупности поля должна достигать минимума для любого n . Эмпирические ортогональные функции, минимизирующие сумму квадратов ошибок разложения, образуют наилучший базис для представления исходного ансамбля. Этот базис является специфическим для каждого конкретного случая разложения. До применения метода ЭОФ из полученного ансамбля точек вычиталось среднее климатическое поле. Далее, из полученных полей вычитался линейный тренд и проводилось их разложение по эмпирическим ортогональным функциям. В итоге, были получены первые пять пространственных мод в рассматриваемом регионе, вносящих максимальный вклад в дисперсию, и соответствующие каждой моде временной коэффициент ПТВ.

Временные ряды и коэффициенты разложения по эмпирическим ортогональным функциям подвергались статистическому анализу, для чего использовались стандартные алгоритмы и программы.

Результаты, их анализ и обсуждение.

Глобальные пространственно-временные структуры приземной температуры воздуха за 1948 – 2000 гг.

Рассмотрим пространственную структуру главной ЭОФ ПТВ, полученную по данным реанализа *NCEP* и результатам работы климатических моделей *UKMO-HadCM3*, *MIROC3.2H*, *MPI_ECHAM5* и *GFDL-CM2.1*, для этого обратимся к рис. 1.

Глобальная лидирующая пространственная мода ПТВ, полученная по модельным расчетам (1948 – 2000 гг.) и данным реанализа *NCEP*, демонстрируют общее сходство. В пространственном распределении первой ЭОФ по данным модели *UKMO-HadCM3*, так же как и по реанализу *NCEP*, имеется экстремум над севером Евразии и дипольная структура над северо-востоком Тихого океана и Северной Америкой. По данным модели *GFDL-CM2.1* описанные экстремумы также выделяются, хотя они значительно менее выражены. В пространственной структуре первой ЭОФ по данным моделей *MIROC3.2H* и *MPI_ECHAM5* над Северной Америкой отмечается лишь обширный экстремум вместо дипольной структуры. Что касается соответствующих первой моде временных коэффициентов, то они практически не коррелируют с временным коэффициентом по данным реанализа.

Синхронные коэффициенты корреляций между соответствующими временными коэффициентами мод ПТВ, полученными по реанализу *NCEP* и расчетами прогностических моделей за 1948 – 2000 гг. сведены в табл. 1. – они не значимы даже на 80 % уровне вероятности.

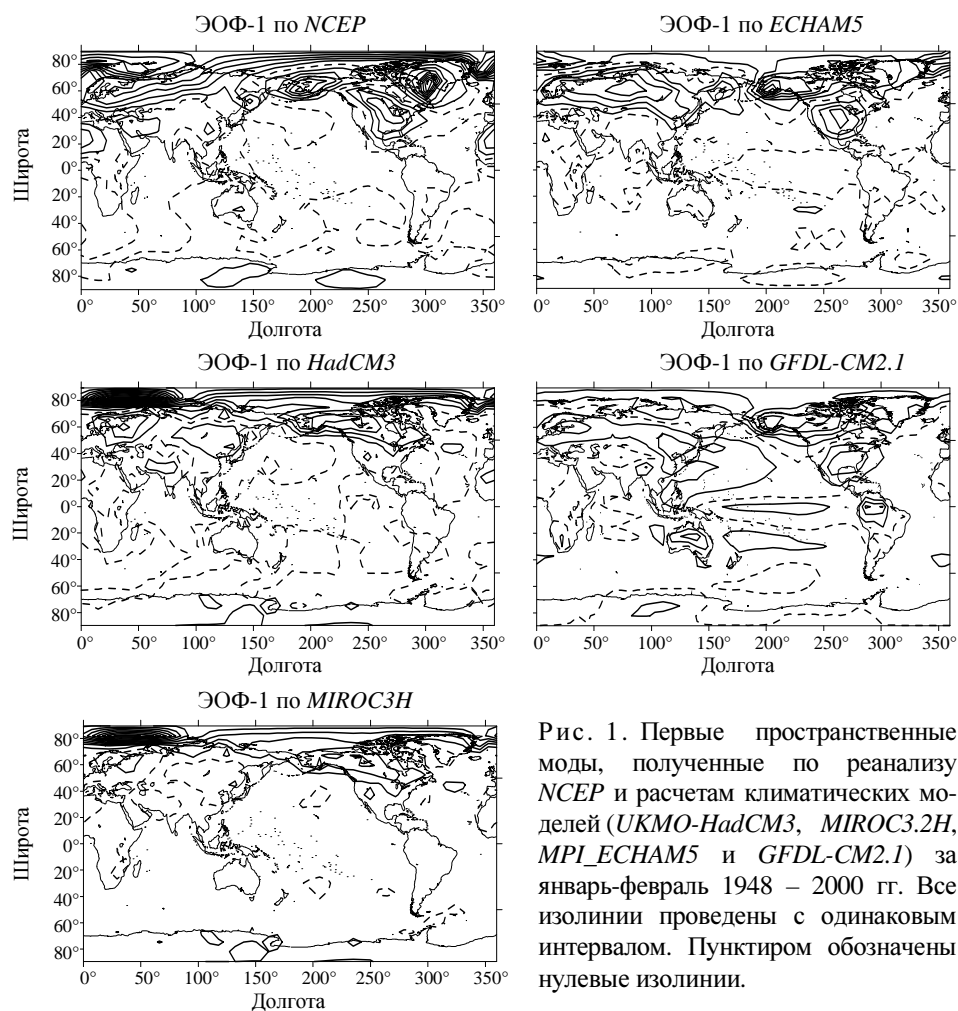


Рис. 1. Первые пространственные моды, полученные по реанализу NCEP и расчетам климатических моделей (UKMO-HadCM3, MIROC3.2H, MPI_ECHAM5 и GFDL-CM2.1) за январь-февраль 1948 – 2000 гг. Все изолинии проведены с одинаковым интервалом. Пунктиром обозначены нулевые изолинии.

Таблица 1. Синхронные коэффициенты корреляций между соответствующими временными коэффициентами мод ПТВ, полученными по реанализу NCEP и расчетами моделей за 1948 – 2000 гг.

Модель	Порядковый номер временного коэффициента				
	1	2	3	4	5
MIROC3H	0,18816	0,049734	0,187558	0,094627	0,089455
HadCM3	0,08675	-0,146700	-0,039600	-0,157640	-0,007500
ECHAM5	0,00802	0,048241	-0,059750	0,064748	0,237864
GFDL-CM2.1	0,02400	-0,183690	-0,003980	-0,184520	-0,219790

Таким образом, проведенные результаты подтверждают мнение авторов работы [4], что на глобальном масштабе рассматриваемые модели не способны адекватно моделировать временную изменчивость ПТВ, описываемую первой ЭОФ. Однако, исходя из того, что главная глобальная мода (см. рис. 1), описывает не более 20 % общей дисперсии поля ПТВ, существует некоторая вероятность, что на региональном масштабе изменчивость ПТВ, обеспечивающая остальные 80 % дисперсии, может воспроизводиться лучше. Кроме этого интересно выяснить – описывают ли прогностические модели наблюдаемые региональные тренды (напомним, что перед разложением полей ПТВ по эмпирическим ортогональным функциям линейные тренды удалялись). Поэтому сравним региональные флуктуации ПТВ и тренды по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях, массива *CRU* и результатам прогностических расчетов для региона Украины.

Сравнение изменчивости ПТВ по данным наблюдений, CRU и результатам прогностических расчетов на 1948 – 2000 гг. для региона Украины.

Для верификации результатов моделирования климата второй половины XX века удобно использовать среднемесячные данные наблюдений *CRU* (интерполированные в узлы регулярной сетки [9]), т.к. эти узлы совпадают с узлами расчетной сетки в прогностических моделях. Рассмотрим ряды ПТВ в точках, относящимся к районам Львова, Одессы и Полтавы, расположенных в разных частях Украины, и практически совпадающих с гидрометеорологическими станциями. Заметим, что дальнейший иллюстративный материал в статье относится преимущественно к району Львова. Результаты для других районов Украины похожи.

Начнем с анализа линейных трендов ПТВ по данным наблюдений *CRU* и результатам расчетов, проведенных с помощью рассматриваемых моделей. Результаты, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что значимый тренд по данным *CRU* выделяется только в марте. Причем он воспроизводится только моделью *HadCM3*. Другие модели (*MIROC3.2_H*, *ESCHAM5*) не воспроизводят правильно даже знак тренда.



Рис. 2. Линейные тренды приземной температуры воздуха (за период 1948 – 2000 гг.) согласно данным *CRU* (район Львова) и данным соответствующей модели. По оси X отложен номер месяца – с января (1) по декабрь (12). Значимыми (на 95 % уровне) являются тренды только по данным *CRU* и модели *HadCM3* в марте.

Другим важным условием качества моделей является согласованность флуктуаций. Рассмотрим ее, сравнивая данные *CRU* и результаты климатических моделей над регионом Украины за 1948 – 2000 гг. Коэффициенты корреляции между данными *CRU* и результатами климатических моделей, показанные на рис. 3, являются незначимыми.

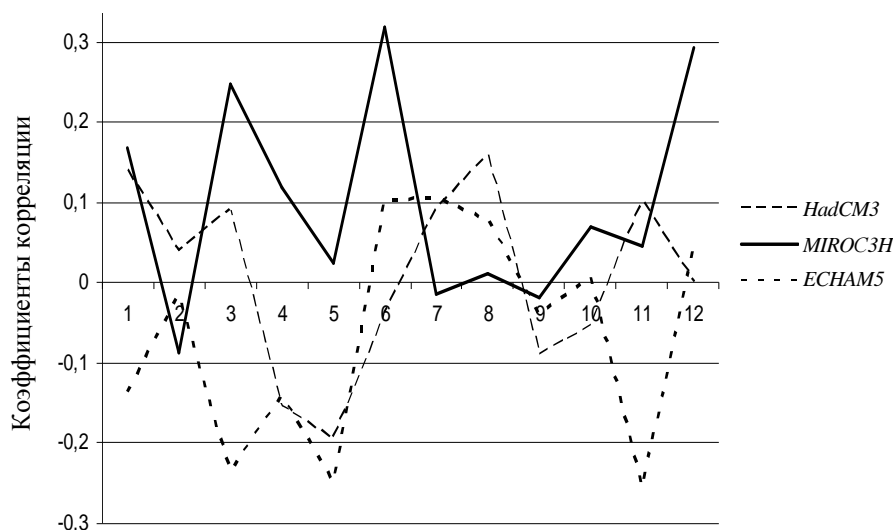


Рис. 3. Ежемесячные коэффициенты корреляции между данными *CRU* (район Львова) и данными соответствующей модели (*HadCM3*, *MIROC3H* и *ECHAM5*) за 1948 – 2000 гг. По оси X отложен номер месяца – с января (1) по декабрь (12).

Максимальные коэффициенты корреляции получены по модели *MIROC3H*. Однако они не превышают 0,29 – 0,31. Причем в течение года наблюдается резкие смены знака корреляционных связей от одного месяца к другому. Это свидетельствует об отсутствии приемлемого описания региональных флуктуаций ПТВ совместными моделями океана-атмосферы на межгодовом-декадном масштабе изменчивости.

Сравнение флуктуаций поля ПТВ в данных реанализа JRA-25 и результатах моделирования проекций климата (2000 – 2010 гг.) для региона Украины.

Кроме прогностических результатов моделирования климата XX века, в рамках проекта *CMIP3* проведено моделирование сценарных проекций климата для XXI века. Это позволяет произвести сравнение реального межгодового хода ПТВ за первую декаду XXI века и результатов моделирования проекций климата для начала XXI века. В настоящей работе это делается с использованием сценария *A1B* [1]. Этот сценарий предполагает увеличение углекислого газа до уровня 720 ppm к концу 2100 года и является одним из наиболее вероятных.

В связи с тем, что доступные данные *CRU* ограничены по времени концом XX века, то наиболее подходящими для сравнения являются данные реанализа *JRA-25*. Данные начинаются с 1979 г., когда появились постоян-

ные спутниковые наблюдения, являются достаточно качественным продуктом [11 – 14], имеющим приемлемое пространственное разрешение, и регулярно обновляются на сайте Японского метеорологического агентства (<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>).

Результаты сравнения проекций климата рассматриваемыми моделями в рамках сценария *A1B* и данных реанализа для района Львова представлены в табл. 2, в которой приведены коэффициенты корреляции соответствующих моделей с реанализом *JRA-25*, а также разница между средним значением, линейным трендом, среднеквадратическим отклонением (СКО) указанных моделей и реанализом *JRA-25*, и на рис. 4.

Таблица 2. Сравнение реального межгодового хода ПТВ (реанализ *JRA-25*) и результатов моделирования проекций климата в районе Львова за 2000 – 2010 гг. в рамках сценария *A1B*.

Месяц	Параметр	Модель			
		<i>HadCM3</i>	<i>GFDL 2.1</i>	<i>MIROC3H</i>	<i>ECHAM5</i>
Январь	Коэффициент корреляции	-0,074	-0,174	0,457	0,189
	Разница между средними значениями, °С	-2,39	0,90	2,07	-0,66
	Разница между трендами, °С/год	0,89	-0,36	0,28	-0,14
	Разница между СКО, °С	1,90	0,68	-0,67	0,54
Июль	Коэффициент корреляции	0,0688	-0,018	-0,339	0,1089
	Разница между средними значениями, °С	-0,38	-2,37	2,95	-2,52
	Разница между трендами, °С/год	-0,05	-0,02	0,13	0,11
	Разница между СКО, °С	0,17	-0,58	-0,54	0,04

Они показывают, что трудно выделить одну или несколько моделей, которые бы приемлемо воспроизводили изменчивость температуры в начале XXI века. Коэффициенты корреляции между прогностическими данными и результатами реанализа не значимы даже на 90 % уровне для всех моделей. При этом модель *ECHAM5* дает минимальные ошибки при расчете линейного тренда, среднего и среднеквадратического отклонения (СКО) ПТВ для января месяца, а модель *HadCM3* – для июля (кроме СКО). Максимальный коэффициент корреляции между прогностической ПТВ и данными реанализа отмечается для январской ПТВ, полученной в модели *MIROC3H* (до 0,46). Однако июльские данные этой модели отрицательно коррелируют с данными реанализа.

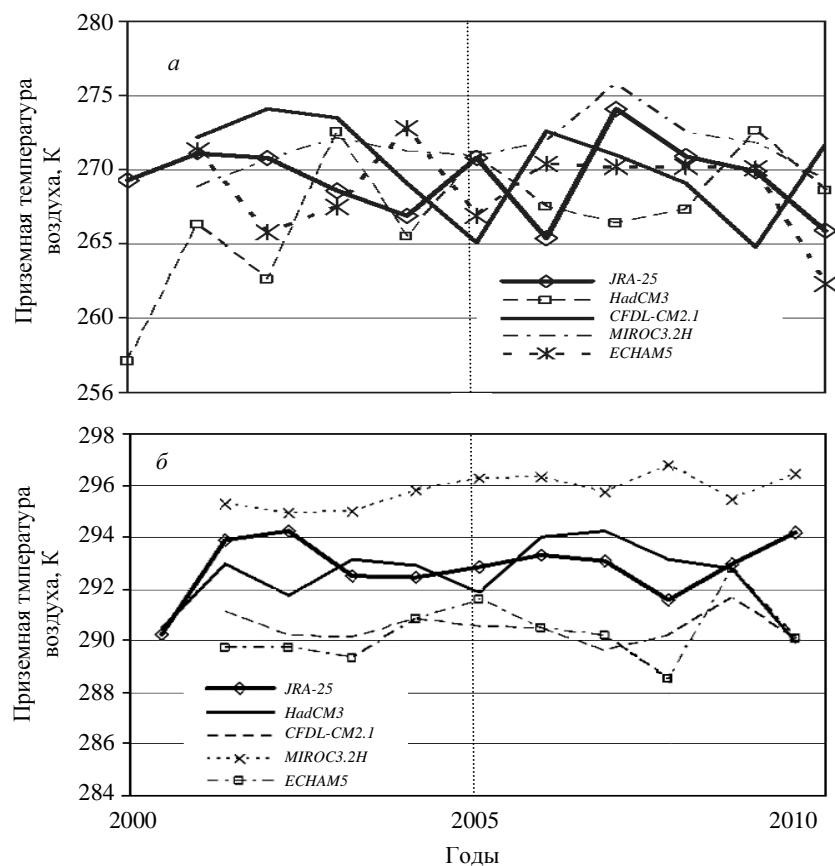


Рис. 4. Ежегодные значения ряда ПТВ согласно реанализу *JRA-25* и данным соответствующей модели за 2000 – 2010 гг. (район Львова) в рамках сценария *A1B*: *a* – для января месяца; *б* – для июля месяца.

Выводы.

В целом, можно сформулировать следующие основные результаты данной работы:

- на глобальном масштабе рассматриваемые модели не способны адекватно моделировать лидирующую пространственно-временную ЭОФ изменчивости ПТВ. Особенно плохо воспроизводится временная изменчивость первой ЭОФ.
- при воспроизведении климата XX столетия для территории Украины тенденции изменения поля ПТВ несколько лучше воспроизводятся моделью *HADCM3*. Климатические флуктуации ПТВ воспроизводятся плохо; максимальные коэффициенты корреляции между данными моделей и массива *CRU* не превышают 0,3.
- моделирование проекций региональных изменений ПТВ всеми моделями для территории Украины неудовлетворительно.

Работа выполнена частично в рамках украинско-литовского сотрудничества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *IPCC Fourth Assessment Report «Climate Change 2007» (AR4)* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press. [Электронный ресурс]. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml. Retrieved 2011-06-14.
2. *Zhou, Tian-Jun and Rucong Yu.* Twentieth Century Surface Air Temperature over China and the Globe Simulated by Coupled Climate Models // *Journal of Climate.* – 2006. – v. 19, № 22. – P. 5843-5858.
3. *Handorf D., Dethloff K.* Potentially Predictable Patterns of the Tropospheric Circulation in the IPCC AR4 Multi-model Ensemble // *Conference on Decadal Predictability.* ICTP Trieste August 16, 2010
4. *Gonzalez-Reviriego N., Rodriguez-Puebla C., Rodriguez-Fonseca B.* Northern Hemisphere Teleconnection indices simulated with CMIP3 // *Geophysical Research Abstracts.* – 2010. – v. 12. – EGU2010-381-2.
5. *Kucharski F, Ngar-Cheung Lau, and Mary Jo Nath, et. al.* The CLIVAR C20C project: skill of simulating Indian monsoon rainfall on interannual to decadal timescales. Does GHG forcing play a role? // *Climate Dynamics.* – 2009. – v. 33, № 5. – P. 615-627
6. *Scaife A., Kucharski F., Folland C. K. et.al.* The CLIVAR C20C project: selected twentieth century climate events // *Climate Dynamics.* – 2008. – v. 33, № 5. – P. 603-614.
7. *Мелешко В.П., Катцов В.М., Мирвис В.М., Говоркова В.А., Павлова Т.В.* Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного воздействия на климат и новые возможности оценки его изменений на территории России // *Метеорология и гидрология.* – 2008. – № 6. – С. 5-19.
8. *Говоркова В.А., Катцов В.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Школьник И.М.* Климат России в XXI веке. Часть 2. Оценка пригодности моделей СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России // *Метеорология и гидрология.* – 2008. – №.8. – С.5-19.
9. *Van Oldenborgh G.J., Philip S.Y., Collins M.* El-Nino in a changing climate: a multimodel study // *Ocean Science.* – v. 1. – P. 81-95.
10. *Mitchell T. D. and P. D. Jones.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // *International Journal of Climatology.* – 2005. – v. 25. – P. 693-712.
11. *Basharin D.* Variability of the surface meteorological fields over Eurasia for the recent 30 years // *Pre-prints of International Center Theoretical Physics, №IC/2009/077.* – 2009. – 16 p. (<http://publications.ictp.it>).
12. *First WCRP International Conference on Reanalyses,* Silver Spring, Maryland, USA, 27-31 Oct. 1997.
13. *Second WCRP International Conference on Reanalyses* (Wokefield Park, nr Reading, UK, 23-27 August 1999).
14. *Third WCRP International Conference on Reanalyses.* The University of Tokyo (Japan), 28 January – 1 February, 2008.

Материал поступил в редакцию 15.12.2010 г.

После доработки 25.04.2011 г.