

Д.В.Башарин\*, А.Б.Полонский\*, Г.Станкунавичус\*\*

\**Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

\*\**Вильнюсский Университет, г.Вильнюс*

## ВЕРОЯТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ В ЕВРОПЕ К КОНЦУ ТЕКУЩЕГО СТОЛЕТИЯ

Настоящая работа посвящена расчету вероятных климатических изменений в поле приземной температуры воздуха (ПТВ) и осадков Европейского региона к концу текущего столетия по данным прогностических расчетов в рамках совместных глобальных моделей океана и атмосферы проекта *CMIP5*. На основе современных сценариев выбросов парниковых газов (RCP4.5/RCP8.5) получены пространственные распределения оценок будущих изменений в полях ПТВ и осадков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *совместные глобальные модели океана-атмосферы, проект CMIP5, вероятные изменения температуры воздуха и осадков, моделирование климата.*

**Введение.** Современное поколение глобальных циркуляционных моделей – хороший инструмент для анализа вероятных тенденций изменения климата будущего [1-2]. С их помощью осуществляют расчеты большого числа гидрометеорологических параметров системы океан-атмосфера: давления, температуры воздуха и воды, влажности, направление и скорости ветра, осадков и пр. Одни из наиболее важных для практических целей – поля приземной температуры воздуха и осадков [3]. Использование результатов расчета совместных моделей океана и климата является значимым шагом вперед в развитии методов исследования климата. Недавно завершившийся международный проект *CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5)* по сравнению последних версий национальных совместных моделей океан-атмосфера дает количественную основу для отчета международной группы экспертов по изменению климата (IPCC) [1]. В данной фазе проекта было повышено пространственно-временное разрешение моделей, увеличено количество используемых глобальных циркуляционных моделей, изменены сценарии для расчета климата будущего [4].

Предварительные результаты по проекту *CMIP5* уже опубликованы [5]. Согласно этим результатам, амплитуда явлений Эль-Ниньо и спектр температуры поверхности океана в Тихом океане оказались более реалистичными по сравнению с проектом *CMIP3*. Однако другие параметры, к примеру, суммарный поток тепла на востоке Тихого океана, воспроизводятся в *CMIP5* хуже. В общем, установлено, что не все модели качественно описывают наблюдаемые изменения климата [6 – 7]. Это в первую очередь касается Европейского региона с его интенсивной естественной климатической изменчивостью. Использование результатов всех возможных климатических моделей может приводить к расширению так называемых областей с противоречивым откликом моделей «*inconsistent model responses*» [5]. Поэтому стоит выбирать из всего множества доступных моделей отдельные, которые максимально качественно описывают современный климат. Исходя из всего выше сказанного, целью работы явилось оценка глобальных климатических изменений в Европейском регионе к концу этого века в полях приземной температуры воздуха и осадков на основе выбранных моделей *CMIP5*, способных наилучшим образом воспроизводить современный климат.

© Д.В.Башарин, А.Б.Полонский, Г.Станкунавичус, 2013

**Данные, методы и результаты.** В данной работе использовались результаты расчетов в рамках проекта *CMIP5*. Их типичное пространственное разрешение от 0,9 до 2,8°. Список использованных моделей приведен в табл. Для верификации результатов моделирования использовались данные Климатического центра Университета Восточной Англии (*CRU*), построенные на основе прямых наблюдений, проинтерполированных на регулярную пространственную сетку 0,5° × 0,5° [8].

*Исторические расчеты.* На начальном этапе работы анализировались исторические расчеты *CMIP5* для глобального поля приземной температуры воздуха (ПТВ). Цель анализа состояла в том, чтобы выяснить какие из моделей максимально правильно воспроизводят наблюдаемые изменения ПТВ. Исторические расчеты по полю осадков не анализировались, так как даже в реанализах (как *NCEP*, *ERA40*, *JRA25*) их региональные климатические величины могут сильно различаться между собой [9]. Таким образом, для поля ПТВ по каждой модели были рассчитаны линейные тренды за 1950 – 2005 гг. Далее расчеты сравнивались с данными *CRU* за тот же временной период.

Для зимнего сезона, когда атмосферные процессы средних широт северного полушария особенно интенсивны, климатические модели показали достаточно разнообразными результаты. Однако китайская модель *BCC-CSM1.1*, норвежская *NorESM1*, австралийская *CISRO-MK36* и российской модель *INMCM4* часто обнаруживают статистически значимые, но нереальные отрицательные тренды в поле температуры над Европейским регионом. Все остальные модели воспроизводят положительные или незначимые тренды ПТВ и могут воспроизвести наблюдаемое потепление в Европейском регионе при ансамблевом осреднении за 1950 – 2005 гг.

Т а б л и ц а . Список *CMIP5* моделей рассматриваемых в этой работе. Для каждой модели приведены атмосферное разрешение (горизонтальное и вертикальное), количество доступных исторических ансамблей расчета и число модельных расчетов климата будущего (на момент середины мая 2013 г.).

основная информация		разрешение		кол-во расчетов	
имя модели	организация	горизонтальн.	вертикальн.	историч.	<i>RCP</i>
<i>BCC-CSM1.1</i>	<i>BCC, China</i>	128 × 64	26	3	1
<i>CanESM2</i>	<i>CCCma, Canada</i>	128 × 61	35	5	5
<i>CNRM-CM5</i>	<i>CNRM, France</i>	256 × 128	31	5	10
<i>CSIRO-Mk3.6.0</i>	<i>CSIRO, Australia</i>	192 × 96	18	4	5
<i>CISRO-ACCESS1</i>	<i>CSIRO, Australia</i>	192 × 144	26	1	1
<i>GFDL-CM3</i>	<i>GFDL/USA</i>	144 × 90	24	1	5
<i>HadGEM2ES</i>	<i>MOHC, UK</i>	192 × 144	38	1	5
<i>HadGEM2AO</i>		192 × 144	38	2	1
<i>INMCM4</i>	<i>INM, Russia</i>	180 × 120	21	6	6
<i>IPSL-CM5A-LR</i>	<i>IPSL, France</i>	96 × 96	39	4	6
<i>MPI-ESM-LR</i>	<i>MPI-M, Germany</i>	192 × 96	47	3	3
<i>MPI-ESM-MR</i>		192 × 96	95	3	1
<i>NCAR-CCSM4</i>	<i>NCAR, USA</i>	288 × 192	26	6	6
<i>MIROC5</i>	<i>MIROC Japan</i>	256 × 128	80	5	5
<i>NorESM1-M</i>	<i>NCC, Norway</i>	144 × 96	26	3	1

[2, 6]. Для одинаковых климатических моделей с различным разрешением (*MPI-ESM-LR* и *MPI-ESM-MR*) предпочтение отдавалось версиям, имеющим большее количество сценарных расчетов, т.е. *HadGEM2ES* и *MPI-ESM-LR*. Для лучших моделей (*CNRM-CM5*, *HadGEM2ES*, *GFDL-CM3*, *CanESM2*, *IPSL-CM5A*, *MIROC5*, *MPI-ESM-LR*, *MRI-CGCM3*, *CISRO-ACCESS1* и *NCAR-CCSM4*) были также проанализированы тренды ПТВ и летом. Их воспроизведение по сравнению с данными наблюдений *CRU* для всех этих десяти моделей заслуживает удовлетворительной оценки (по структуре распределения линейных трендов и их максимальным величинам в Европейском регионе).

На следующем этапе проверялось качество воспроизведения естественной региональной изменчивости климата глобальными моделями в конце предыдущего столетия. Для этого рассчитывалась лидирующая климатическая мода ПТВ для Европейского региона, которая представляет собой типичную дипольную структуру, обусловленную Североатлантическим колебанием (САК). Известно, что пространственная структура САК воспроизводится достаточно неплохо большинством глобальных моделей [7]. Однако в воспроизведении временной изменчивости лидирующей моды ПТВ в проекте *CMIP5* сделан определенный шаг вперед. Значимые коэффициенты корреляции (между временными структурами лидирующих мод, полученных на основе среднего ансамбля по каждой модели и по данным *CRU*) свидетельствуют, что большинство моделей добились воспроизведения крупномасштабной временной изменчивости Европейского региона на значимом уровне, за исключением *MRI-CGCM3*, *CISRO-ACCESS1* и *NCAR-CCSM4*, которые поэтому и не вошли в итоговый мультимодельный ансамбль.

Анализ проводился следующим образом. Для всех возможных комбинаций семи моделей (*CNRM-CM5*, *HadGEM2ES*, *GFDL-CM3*, *CanESM2*, *IPSL-CM5A*, *MIROC5*, *MPI-ESM-LR*) рассчитывалась внутри-ансамблевая дисперсия различных групп моделей за 1986 – 2005 гг. В итоге анализ показал, что только при включении расчетов модели *IPSL* происходит значимый (на 95 % уровне) рост (в 2 раза) максимальной мультимодельной дисперсии в Европейском регионе. Поэтому ее расчеты не были включены в итоговый мультимодельный ансамбль. Таким образом, основываясь на проведенном анализе исторического расчета моделей проекта *CMIP5*, можно заключить, что использование результатов численного расчета моделей *CNRM-CM5*, *HadGEM2ES*, *GFDL-CM3*, *CanESM2*, *MIROC5* и *MPI-ESMLR* наиболее оптимально для более точной оценки будущих климатических изменений.

*Расчеты на основании климатических сценариев.* В результатах проекта *CMIP5* появились четыре новых климатических сценария выбросов парниковых газов (*RCP* – «representative concentration pathway»). Наиболее хорошо исследованными сценариями климата будущего считаются два из них [4]: *RCP4.5* и *RCP8.5* с внешним форсированием 4,5 и 8,5  $Wm^{-2}$  соответственно. Для всех климатических моделей эти климатические сценарии представлены наибольшим числом ансамблевых расчетов по сравнению с двумя другими: *RCP2.6* и *RCP6.0*. Их количество варьируется от 1 до 10 для каждой модели. *RCP4.5* предусматривает увеличение эмиссии углерода до 10 Гт/год (также и других парниковых газов) в атмосфере к середине этого века и его уменьшение практически до близкого к современному уровню к концу века. Самый пессимистический сценарий – *RCP8.5* предусматривает экспоненциальное увеличение количества углерода в атмосфере к концу XXI в. примерно в 2,5 раза относительно современного. В рамках этих 2 сценариев и проводился дальнейший анализ.

Основываясь на выбранном ранее мультимодельном ансамбле из шести моделей, были рассчитаны вероятные глобальные климатических изменения в полях приземной температуры воздуха и осадков к концу этого века по двум имеющимся сценариям. Для приземной температуры была рассчитана разность между мульти-

модельным средним за 2070 – 2099 и 1976 – 2005 гг., а для осадков разность между мультимодельным средним 2070 – 2099 и 1976 – 2005 гг. и нормированием их на реальные значения осадков по данным *CRU*. В работе [6] авторы величину осадков нормировали на современный модельный климат. Нормирование модельной разницы на современные значения, полученные по наблюдениям, более предпочтительно [8], так как региональные осадки даже в различных реанализах могут сильно отличаться друг от друга, не говоря уже о полученном модельном климате осадков.

**Результаты, их обсуждение и заключение.** Результаты проведенного расчета Европейских изменений среднего климата будущего, за 2070 – 2099 гг., относительно 1976 – 2005 гг. для сценария *RCP4.5* заключаются в следующем. Зимой максимальные изменения порядка 5 – 5,5 °С ожидаются на северо-востоке Европы / над Европейской территорией России (ЕТР). Типичные Европейские изменения ПТВ – около 2 – 4 °С. Летом же они достигают 5 °С на юге Европы и 2,5 – 3 °С на севере. Что касается осадков, то их изменения незначимы в зимний сезон, а летом на большей части Европы, будет наблюдаться их уменьшение до 20 – 40 %, при максимальных величинах (около 80%) над территорией Греции и Турции. Исключение составляет север Европы, где изменения незначимы. Сценарий *RCP8.5*, естественно, демонстрирует большее потепления климата. Зимой максимальные изменения достигают 9 °С на северо-востоке Европы при их типичных величинах – около 3 – 7 °С. Летом же ПТВ вырастет на 9 °С на юге Европы и на 4 – 7 °С на севере. Изменения осадков зимой также незначимы над большей частью Европы, за исключением ЕТР, где отмечается их значимый рост на 10 – 20 %. А летом – их уменьшение на большей части Европы (порядка 50 %), при максимальных величинах также над территорией Греции и Турции.

Данные результаты по своим тенденциям и величине этих изменений в целом хорошо согласуются с четвертым отчетом *IPCC* [4] и опубликованным анализом расчетов по моделям *CMIP5* [6]. Однако можно заметить и некоторые различия. По сравнению с данными работы [6] изотермы не так четко оконтуривают материки, возможно вследствие достаточно плохого разрешения одной из модели *CanESM2*, включенной в выбранный мультимодельный ансамбль. Отличия так же касаются и величины выявленных изменений. Так зимой на севере Евразии они меньше на 1 – 2 °С, по сравнению с приведенными в работе [6]. Вместе с тем полученные распределения ПТВ и осадков в Европейском регионе характеризуются большей региональной изменчивостью из-за гораздо меньшего ансамбля моделей.

Что касается климата осадков, то распределения в большей части так же очень схожи с [6] по знаку и величине. Полученные результаты подтверждают, что летний сезон принесет уменьшение осадков на большей части региона. При всем при этом, хорошо известно, что анализируемый регион характеризуется интенсивной пространственно временной изменчивостью траекторий циклонов [7], изменчивость которых все еще достаточно плохо воспроизводится климатическими моделями. Поэтому данный результат должен рассматриваться в качестве грубой региональной оценки, характеризующейся большей пространственной неоднородностью.

Климатические модели проекта *CMIP5* лучше предыдущих в том смысле, что они лучше воспроизводят многие процессы и их особенности в климатической системе. Однако, не смотря на все это, они все же не достаточно хороши [5]. Недооценка или переоценка температуры, осадков, влажности почвы и других параметров, приводит к тому, что экстремальные погодные условия, сама изменчивость приземных гидрометеорологических полей (различных временных масштабов) и даже текущие тенденции изменения климата все еще недостаточно хорошо воспроизводятся. В связи с этим хотелось бы надеяться, что непрекращающиеся развитие климатических моделей и внедрение еще более высокоэффективных компьютерных технологий передачи и обработки данных приведет к значительному повышению точности климатических прогнозов в будущем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of *CMIP5* and the experiment design // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*– 2012.– v.93, №. 4.– P.485-498.
2. *Deser C. et al.* Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability // *Climate dynamics.*– 2012.– v.38, № 3-4.– P.527-546.
3. *Climate change 2007: The fourth assessment report of the IPCC.*– Cambridge University Press, 2007.– v.4.– 251 p.
4. *Meinshausen M. et al* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // *Climatic Change.*– 2011.– v.109, № 1-2.– P.213-241.
5. *Guilyardi E. et al* A first look at ENSO in *CMIP5* // *Clivar Exchanges.*– 2012.– v.17, № 1.– P.29-32.
6. *Knutti R., Sedláček J.* Robustness and uncertainties in the new *CMIP5* climate model projections // *Nature Climate Change.*– 2013.– 3.– P.369-373. doi:10.1038/nclimate1716
7. *Полонский А.Б., Башарин Д.В., Станкинавичус Г.* Сравнение климатической изменчивости приземной температуры воздуха по данным наблюдений и результатам климатических расчетов: региональный и глобальный масштаб // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– вып.24.– С.142-150.
8. *Mitchell T.D., Jones P.D.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // *Intern. J. Climatology.*– 2005.– 25.– P.693-712.
9. *Bosilovich M.G. et al* Evaluation of global precipitation in reanalyses // *J. Appl. Meteorol. and Climatol.*– 2008.– v.47, № 9.– P.2279-2299.

Материал поступил в редакцию 29.06.2013 г.

**АНОТАЦІЯ** Дана робота присвячена розрахунку ймовірних кліматичних змін в полі приземної температури повітря (ПТП) та опадів Європейського регіону до кінця поточного століття за даними прогнозованих розрахунків у рамках спільних глобальних моделей океану і атмосфери проекту *CMIP5*. На основі сучасних сценаріїв викидів парникових газів (*RCP4.5/RCP8.5*) отримані просторові розподілення оцінок майбутніх змін в Європі в полях ПТП і опадів.

**ABSTRACT** The ability of the climate models participating in the Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5 (*CMIP5*) to replicate historical trends and variability of the surface air temperature and precipitation fields over the Europe in the second part of the XX century was analysed in this paper. There were selected climate models that better reproduce analysed fields over European domain. The climate changes in surface air temperature and precipitation for the selected climate models were examined by the end of this century according to the *RCP4.5* and *RCP8.5* scenarios.