УДК 551.465.7

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ В ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ К КОНЦУ XXI СТОЛЕТИЯ НА ОСНОВЕ ВЫБРАННЫХ МОДЕЛЕЙ CMIP5

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

Институт природно-технических систем
г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: dbasharin@mail.ru
* Вильнюсский Университет, г. Вильнюс

Работа посвящена оценке предполагаемых изменений в полях приземной температуры воздуха и осадков в Восточно-Европейском регионе к концу текущего столетия по данным прогностических расчетов проекта по сравнению совместных моделей океана и атмосферы CMIP5. Анализ результатов численных экспериментов, проведенный в рамках этого проекта, позволил выбрать модели, которые наилучшим образом воспроизводят климат для контрольного периода (1950 – 2005 гг.). На основе расчетов по этим моделям в рамках двух сценариев выбросов парниковых газов (RCP4.5 и RCP8.5) получены пространственные распределения будущих изменений в полях приземной температуры воздуха и осадков, уточняющие опубликованные оценки.

Введение. Современное поколение глобальных циркуляционных моделей – хороший инструмент для анализа вероятных тенденций изменения климата в будущем. С их помощью осуществляют расчеты большого числа гидрометеорологических параметров: давления, температуры воздуха и воды, влажности, направления и скорости ветра, осадков и многих других [1, 2]. Одни из наиболее важных для практических целей – поля приземной температуры воздуха (ПТВ) и осадков [3]. По данным различных авторов эти гидрометеорологические поля обнаруживают большую изменчивость на территории Восточной Европы различных временных масштабов [4 – 6].

Недавно завершившийся международный проект CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) по сравнению последних версий национальных совместных моделей системы океан-атмосфера дает количественную основу для расчета предполагаемых изменений температуры и осадков к концу XX столетия, в том числе и в Восточно-Европейском регионе. Однако не все модели качественно правильно описывают наблюдаемые глобальные и региональные изменения климата [7 – 12]. В особенности это касается Европейско-Средиземноморского региона, где отмечается интенсивная климатическая изменчивость естественного происхождения. Поэтому использование результатов всех климатических моделей может приводить к увеличению уровня неопределенности получаемых оценок (или к расширению так называемых областей с противоречивым откликом моделей - «inconsistent model responses»). В связи с этим, при исследовании региональных климатических тенденций представляется целесообразным выбирать из всего множества моделей те из них, которые максимально точно описывают современный климат региона и тенденции их изменений. Цель настоящей работы заключается в оценке климатических изменений в Восточно-Европейском регионе к концу этого века в полях приземной температуры воздуха и осадков на основе выбранных моделей CMIP5, способных наилучшим образом воспроизводить региональный современный климат.

Материалы и методики. В работе использовались результаты расчетов в рамках проекта по сравнению совместных моделей океана и атмосферы CMIP5. Их типичное пространственное разрешение от 0.9º до 2,8º. Список использованных моделей приведен в табл. 1. Для верификации результатов моделирования использовались данные Климатического центра Университета Восточной Англии (*CRU*), полученные на основе прямых наблюдений путем их интерполяции на регулярную пространственную сетку 0.5º x 0.5º [8].

Основываясь на исторических расчетах моделей проекта CMIP5 (табл.1) и на данных CRU рассчитывались линейные тренды ПТВ за 1950 – 2005 гг. и эмпири-

ческие ортогональные функции (ЭОФ) для этого же периода. Далее анализировалось качество воспроизведения естественной крупномасштабной изменчивости ПТВ путем сравнения результатов по прогностическим расчетам с расчетами по данным CRU для контрольного периода (1950 – 2005 гг.). Кроме этого контролировался рост величины мультимодельной дисперсии ПТВ. Исторические расчеты по полю осадков не анализировались, так как даже в ре-анализах (таких, как NCEP, ERA40, JRA25) их региональные климатические величины могут принципиально различаться между собой [9].

Для зимнего сезона, когда атмосферные процессы средних широт Северного полушария особенно интенсивны, различные модели показали большой разброс результатов для контрольного периода. Китайская (BCC-CSM1.1), норвежская (NorESM1), австралийская (CISRO-MK36) и российской (INMCM4) модели воспроизводят статистически значимые, но нереальные отрицательные тренды в поле температуры над Восточной Европой. Все остальные модели воспроизводят положительные или незначимые тренды ПТВ и, в принципе, могут использоваться для оценки будущих климатических тенденций в регионе. Для анализа качества воспроизведения естественной крупномасштабной изменчивости ПТВ был проведен корреляционный анализ первых временных коэффициентов в разложении на ЭОФы, который показал, что большинство моделей воспроизводят крупномасштабную изменчивость ПТВ в Восточно-Европейском регионе на значимом уровне. Исключение составляют модели MRI-CGCM3, CISRO-ACCESS1 и NCAR-CCSM4. Поэтому они не вошли в итоговый мультимодельный ансамбль. Анализ роста величины мультимодельной дисперсии выявил, что только при включении в ансамбль расчетов модели IPSL происходит значимый (на 95% уровне) двукратный рост максимальной мультимодельной дисперсии в Восточно-Европейском регионе. Поэтому эта модель была исключена из конечного ансамбля.

Таким образом, основываясь на проведенном анализе исторического расчета моделей проекта CMIP5, был сделан вывод, что использование результатов численного расчета моделей CNRM-CM5, HadGEM2ES, GFDL-CM3, CanESM2, MIROC5 и MPI-ESMLR оптимально для более точной оценки будущих климатических изменений в Восточно-Европейском регионе.

Из всех имеющихся сценариев проекта CMIP5 были выбраны два из наиболее вероятных сценариев антропогенных выбросов парниковых газов: RCP4.5 и RCP8.5 с внешним форсированием к концу столетия 4.5 и 8.5 Wm^{-2} соответственно [4, 13 – 16]. RCP4.5 предусматривает небольшое увеличение эмиссии парниковых газов к середине этого века и ее уменьшение до близкого к современному уровню к концу века. Самый пессимистический сценарий (RCP8.5) предусматривает экспоненциальное увеличение количества парниковых газов в атмосфере к концу века (до 2,5 раз относительно современного). Для всех климатических моделей эти сценарии представлены наибольшим числом ансамблевых расчетов (от 1 до 10 для каждой модели) по сравнению с двумя другими: RCP2.6 и RCP6.0. В рамках этих двух сценариев и проводился дальнейший анализ вероятных изменений в поле ПТВ и осадков.

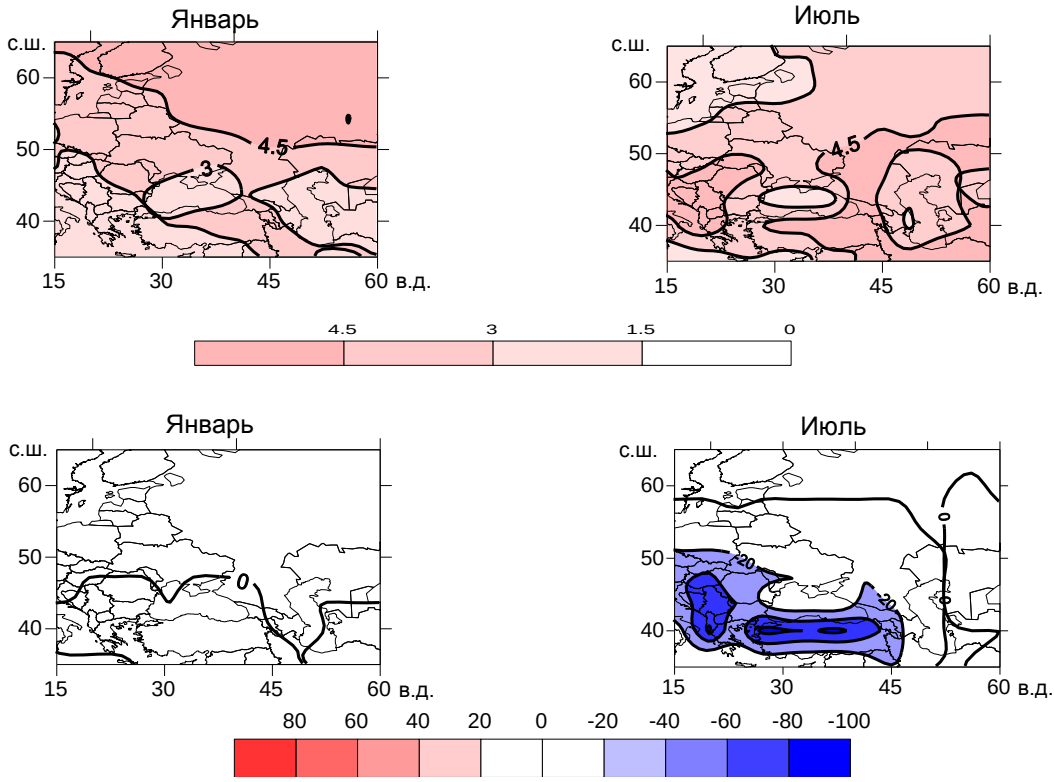
Результаты. В рамках RCP4.5 и RCP 8.5 сценариев для выбранных «лучших» моделей проводился расчет предполагаемых изменений средних ПТВ и осадков за 2070 – 2099 гг. относительно 1976 – 2005 гг. в Восточно-Европейском регионе к концу XX столетия, который показал следующее (рис. 1 и 2).

Зимой для сценария RCP4.5 максимальные изменения в 5 – 5,5ºС ожидаются на северо-востоке Европы (над Европейской территорией России – ЕТР). Типичные изменения ПТВ в других частях Европы – около 2 – 4ºС. Летом же они достигают 5ºС на юге Европы и 2,5 – 3ºС на севере. В поле осадков изменения в зимний сезон незначимы.

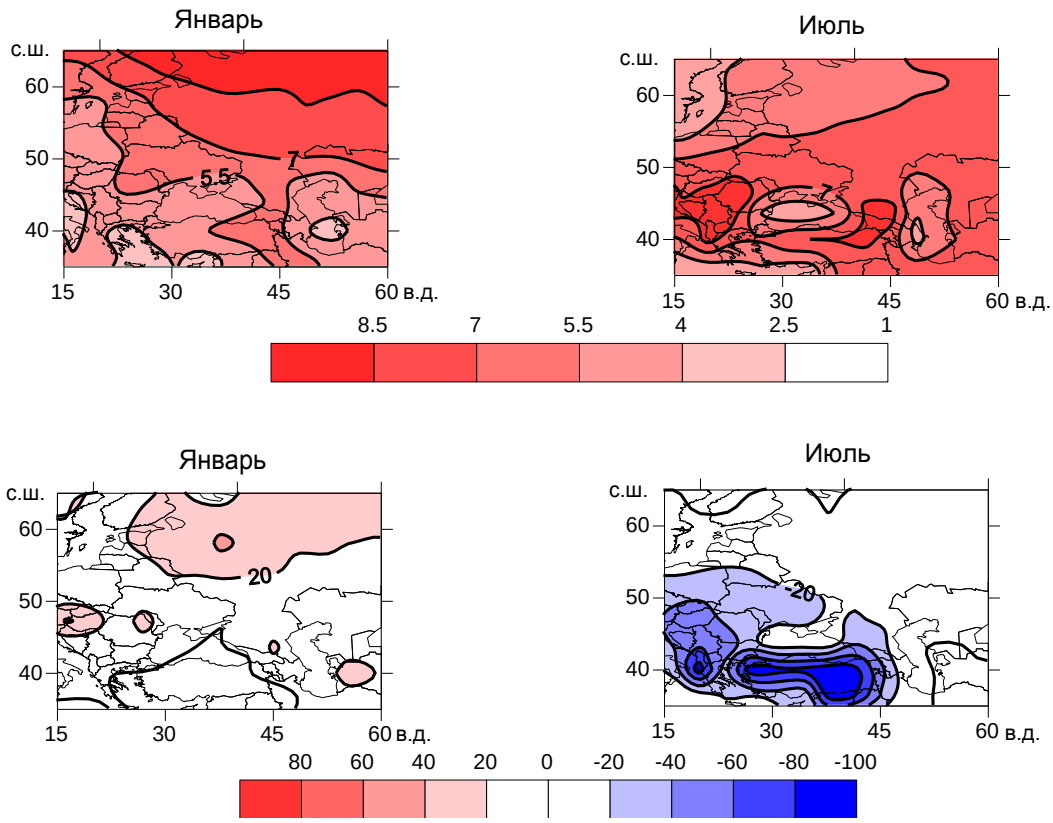
Таблица 1

Список глобальных климатических моделей проекта CMIP5, горизонтальное и вертикальное разрешение, количество доступных исторических ансамблевых расчетов и число модельных расчетов климата будущего, рассматриваемых в работе

	Основная информация	Разрешение		Кол-во расчетов	
№	Имя модели / Организация	Горизонт.	Вертик.	Истор.	RCP
1	BCC-CSM1.1 (BCC, China)	128 x 64	26	3	1
2	CanESM2 (CCCma, Canada)	128 x 61	35	5	5
3	CNRM-CM5 (CNRM, France)	256 x 128	31	5	10
4	CSIRO-Mk3.6.0 (CSIRO, Australia)	192 x 96	18	4	5
5	CISRO-ACCESS1 (CSIRO, Australia)	192 x 144	26	1	1
6	GFDL-CM3 (GFDL, USA)	144 x 90	24	1	5
7	HadGEM2ES (MOHC ,UK)	192 x 144	38	1	5
8	HadGEM2AO (MOHC ,UK)	192 x 144	38	2	1
9	INMCM4 (INM, Russia)	180 x 120	21	6	6
10	IPSL-CM5A-LR (IPSL ,France)	96 x 96	39	4	6
11	MPI-ESM-LR (MPI, Germany)	192 x 96	47	3	3
12	MPI-ESM-MR (MPI, Germany)	192 x 96	95	3	1
13	NCAR-CCSM4 (NCAR, USA)	288 x 192	26	6	6
14	MIROC5, MIROC, Japan	256 x 128	80	5	5
15	MRI-CGCM3 (Met.Res.Inst., Japan)	320 x 160	48	6	1
16	NorESMl-M (NCC, Norway)	144 x 96	26	3	1



Р и с. 1. Пространственное распределение изменений температуры воздуха (верхний ряд) и осадков (нижний ряд) в XXI веке, оцененных по выбранному мульти-модельному ансамблю (CNRM-CM5, HadGEM2ES, GFDL-CM3, CanESM2, MIROC5, MPI-ESM-LR) согласно сценарию RCP4.5. Изменения в полях приземной температуры воздуха (в ºС) и осадков (в %) рассчитывалось по двумя временными интервалам (2070 – 2099 и 1976 – 2005 гг.). Изменения являются значимыми, если по абсолютной величине они превышают 1.5°С (в поле ПТВ) и 20% (в поле осадков)



Р и с. 2. То же, что и на рис.1, но согласно сценарию RCP8.5

Летом над Восточной Европы ожидается их уменьшение (в среднем, на 20 – 40%), при максимальных величинах (около 70%) над территорией Греции и Турции. Исключение составляет север Европы/ЕТР, где изменения осадков летом незначимы.

Сценарий RCP 8.5, естественно, демонстрирует большее потепление климата (ср. рис. 1 и 2). Зимой максимальные изменения достигают 9С° на северо-востоке Европы, а типичные величины роста ПТВ – 3 – 7ºС. Летом же изменения ПТВ достигают 9ºС на юге Европы и 4 – 7ºС на севере. Изменения осадков зимой также незначимы над большей частью Европейского региона, за исключением ЕТР, где отмечается их значимый рост (до 20%). Летом же ожидается их уменьшение в южной части территории Восточной Европы (порядка 20 – 40%), при максимальных величинах (более 80%) также над территорией Греции и Турции. Отметим, что анализируемый регион характеризуется интенсивной пространственно-временной изменчивостью траекторий циклонов [3, 7, 11], которые все еще достаточно плохо воспроизводятся климатическими моделями.

Таким образом, в работе получена уточненная оценка предполагаемой величины изменений в поле ПТВ и осадков в Европейском регионе к концу текущего столетия по данным прогностических расчетов «лучших» моделей CMIP5.

Заключение. Полученные результаты в целом хорошо согласуются с четвертым и пятым отчетами IPCC и опубликованным анализом расчетов по моделям CMIP5. Однако можно заметить и некоторые отличия. Так зимой на севере Восточной Европы полученные нами изменения ПТВ меньше на 1-2ºС. Вместе с тем в нашем случае поле изменений ПТВ в регионе исследования характеризуется большей региональной изменчивостью из-за гораздо меньшего ансамбля моделей. Также Европейский регион в целом характеризуется интенсивной пространственно-временной изменчивостью траекторий циклонов, которые все

еще достаточно плохо воспроизводятся климатическими моделями. Причем эти модели характеризуются достаточно большой внутримодельной дисперсией при моделировании текущих региональных тенденций изменения климата. Поэтому для повышения точности климатических прогностических оценок в будущем необходимо их дальнейшее совершенствование.

Что касается климата осадков, то наши результаты подтверждают, что летний сезон будет сопровождаться уменьшением осадков над южной частью Европейского региона. Таким образом, полученные результаты в целом неплохо согласуются с четвертым и пятым отчетами IPCC, несколько уточняя их.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of CMIP5 and the experiment design // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2012. – Т. 93. – №. 4. – С. 485–498.
2. *Uncertainty* in climate change projections: the role of internal variability / C. Deser [et al.] // Climate dynamics. – 2012. – Т. 38. – №. 3-4. – С. 527–546.
3. *Climate* change 2007: The fourth assessment report of the IPCC. – Cambridge University Press, 2007. – Т. 4. – 339 p.
4. *Precise* dating of Dansgaard–Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data / Genty D. [et al.] // Nature. – 2003. – Т. 421. – №. 6925. – С. 833–837.
5. *Analysis* of daily variability of precipitation in a nested regional climate model: comparison with observations and doubled CO 2 results / Mearns L. O. [et al.] // Global and Planetary Change. – 1995. – Т. 10. – №. 1. – С. 55–78.
6. *Environmental* effects of agri-environmental schemes in Western Europe / Primdahl J. [et al.] // Journal of environmental management. – 2003. – Т. 67. – №. 2. – С. 129–138.
7. *The RCP* greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 / Meinshausen M. [et al.] // Climatic Change. – 2011. – Т. 109, №. 1-2. – С. 213–241.
8. *A first* look at ENSO in CMIP5 / Guilyardi E. [et al.] // Clivar Exchanges. – 2012. – Т. 17. – №. 1. – С. 29–32.
9. *Knutti R., Sedláček J.* Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections // Nature Climate Change\Advance Online Publication. – 2012. – P. 1–5.
10. *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. – С. 142–150.
11. *Mitchell T.D., Jones P.D.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // International Journal of Climatology. – 2005. – 25. – С. 693–712.
12. *Evaluation* of global precipitation in reanalyses / M.G. Bosilovich [et al.] // Journal of applied Meteorology and Climatology. – 2008. – Т. 47. – №. 9. – С. 2279–2299.
13. *RCP4.5*: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 / Thomson A.M. [et al.] // Climatic Change. – 2011. – Т. 109. – №. 1-2. – С. 77–94.
14. *Marine* ecosystem dynamics and biogeochemical cycling in the Community Earth System Model [CESM1 (BGC)]: Comparison of the 1990s with the 2090s under the RCP4. 5 and RCP8. 5 scenarios / Moore J. K. [et al.] // Journal of Climate. – 2013. – Т. 26. – №. 23. – С. 9291–9312.
15. *The challenge* to keep global warming below 2C / Peters G.P. [et al.] // Nature Climate Change. – 2013. – Т. 3. – №. 1. – С. 4–6.
16. *Wang M., Overland J.E.* A sea ice free summer Arctic within 30 years: An update from CMIP5 models // Geophysical Research Letters. – 2012. – Т. 39. – №. 18.