

Член-корреспондент НАН Украины А. Б. Полонский, А. С. Князьков

Пространственно-временная структура регионального поля температуры для региона Украины и Черного моря в глобальных климатических моделях

Проведено сравнение пространственно-временной изменчивости поля температуры для региона Украины и Черного моря, рассчитанного в глобальных климатических моделях GFDL CM-2.1 (США), HadCM-3 (Великобритания), MIROC-3.2 (Япония) и ECHAM-5 (Германия), с полученным по данным гидрометеорологических наблюдений и по результатам ре-анализа для второй половины XX ст. Установлено, что временные тренды температуры несколько лучше описываются моделью GFDL CM-2.1, а пространственно-временная структура первой эмпирической ортогональной моды — моделью ECHAM-5. Отмечено, что результаты моделирования для зимы лучше, чем для лета, хотя в целом качество модельных расчетов неудовлетворительно.

Значительный рост производительности вычислительной техники в последние десятилетия позволил использовать численные модели не только для прогнозов погоды, но и для моделирования изменений глобального климата. Прогрессу в этой области способствует и рост международного сотрудничества, и развитие глобальных средств коммуникации. Результатом такого сотрудничества является реализация в рамках Программы по изучению мирового климата (World Climate Research Programme — WCRP) проекта: сравнение глобальных моделей (Coupled Model Intercomparison Project — CMIP). Этот проект поддерживается Межправительственной группой экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Changes — IPCC). К настоящему времени в рамках проекта CMIP-3 разработаны и протестированы около двух десятков глобальных климатических моделей и предприняты попытки воспроизвести с их помощью изменения климата планеты в XX и XXI столетиях с учетом различных вариантов антропогенного воздействия на окружающую среду. Результаты расчетов представлены, например, на сайтах [1, 2].

При анализе региональных результатов подобных расчетов очень важным является вопрос о границах применимости различных моделей для воспроизведения хотя бы наиболее общих тенденций региональных изменений климата. Если модели воспроизводят некоторые общие закономерности региональных изменений, то можно использовать различные варианты даунскейлинга (т. е. пересчета результатов моделирования на более мелкую сетку) для уточнения региональных закономерностей пространственно-временной изменчивости различных полей. Если же глобальные модели не воспроизводят наблюдаемые региональные изменения климата даже на качественном уровне, применение методов даунскейлинга не приведет к принципиальному улучшению результатов. В связи с этим авторами настоящего сообщения кратко анализируется качество воспроизводимости пространственно-временной структуры поля температуры воздуха в Украине и Черноморском регионе в некоторых глобальных моделях.

Для решения данной задачи использовались результаты численных экспериментов по моделированию климата XX ст. (так называемый проект 20С3М), которые сравнивались

с измерениями, выполненными на гидрометеорологических станциях, либо с данными ре-анализа (т. е. с результатом усвоения данных наблюдений в моделях общей циркуляции). Численные эксперименты проводились для периода с 1850 г. (или 1860 г., в зависимости от модели) и до конца XX ст. Рассматриваемые глобальные климатические модели — многокомпонентны. Основными их частями являются отдельные блоки, описывающие процессы в атмосфере, на суше, в океане и криосфере [3–6], а в некоторых случаях учитываются еще и реки [7]. Блоки связаны между собой с помощью параметризации различных процессов (потоков) на границах между средами. Как построение самих блоков, так и описание пограничных эффектов является сложной задачей, поэтому в разработке каждой из моделей участвуют несколько научных коллективов. За время, прошедшее с появления первых подобных моделей, не только менялись расчетные сетки (в сторону увеличения разрешения), но и каждая из параметризаций физических процессов несколько раз уточнялась. Кроме того, даже в рамках одной группы разработчиков параллельно идет работа с несколькими вариантами моделей, каждая из которых предназначена для решения отдельных задач. Описание всех моделей, участвующих в проекте CMIP, можно найти на сайтах [1, 2].

Из доступных результатов расчетов в рамках эксперимента 20СЗМ нами использовались выходные данные по следующим моделям, представляющие различные научные группы: GFDL CM-2.1 (Лаборатория геофизической гидродинамики, США), HadCM-3 (Центр климатических прогнозов и исследований, Великобритания), MIROC-3.2 (Центр передовых исследований глобальных изменений, Япония) и ECHAM-5 (Метеорологический институт Макса Планка, Германия). Такой выбор обусловлен тем, что в рамках данной работы исследуются межгодовые и более низкочастотные изменения поля температуры, а выбранные модели лучше других зарекомендовали себя при их воспроизведении [8]. В рамках этой работы были использованы два варианта выходных данных моделей: исходные и пересчитанные. Для сравнения с наблюдениями приземной температуры на территории Украины брались выходные данные моделей, представленные на сайтах [1, 2] и полученные для первоначальных расчетных сеток (с разрешением по горизонтали в 2–3°). Для сравнения с результатами ре-анализа для центральной части Черного моря (42,5–44,5° с. ш., 30–40° в. д.) использовались данные моделей, пересчитанные на одноградусную сетку. Таким образом, отдельно сравнивались результаты расчетов и наблюдений для сухопутной части Украины и центральной части Черного моря.

Для сравнения с результатами расчетов на суше использовались среднемесячные данные о приземной температуре воздуха, полученные на 18 гидрометеостанциях Украины за период 1900–2000 гг. Наиболее длинные непрерывные ряды для некоторых станций охватывает весь столетний период, а по другим — только период времени, начиная с 1945 г. Данные наблюдений за период 1945–1988 гг. есть для всех метеостанций. Такие длины рядов позволяют использовать их для климатических оценок. Географическое расположение станций, а также расчетную сетку для модели GFDL CM-2.1 (которая обладает наилучшим пространственным разрешением из всех рассматриваемых моделей) иллюстрирует рис. 1. В качестве данных, с которыми сравнивались результаты расчета по центральной части акватории Черного моря, были использованы данные ре-анализа NCEP/NCAR с 1948 г. [9, 10].

На первом этапе нами проведено сравнение временных рядов для некоторых точек наблюдений и максимально близких к ним узлам расчетной сетки. За основу брали расчеты по модели GFDL. Для сравнения были выбраны данные метеостанций в Крыму, по которым производилось пространственное осреднение, а также температурные ряды, полученные

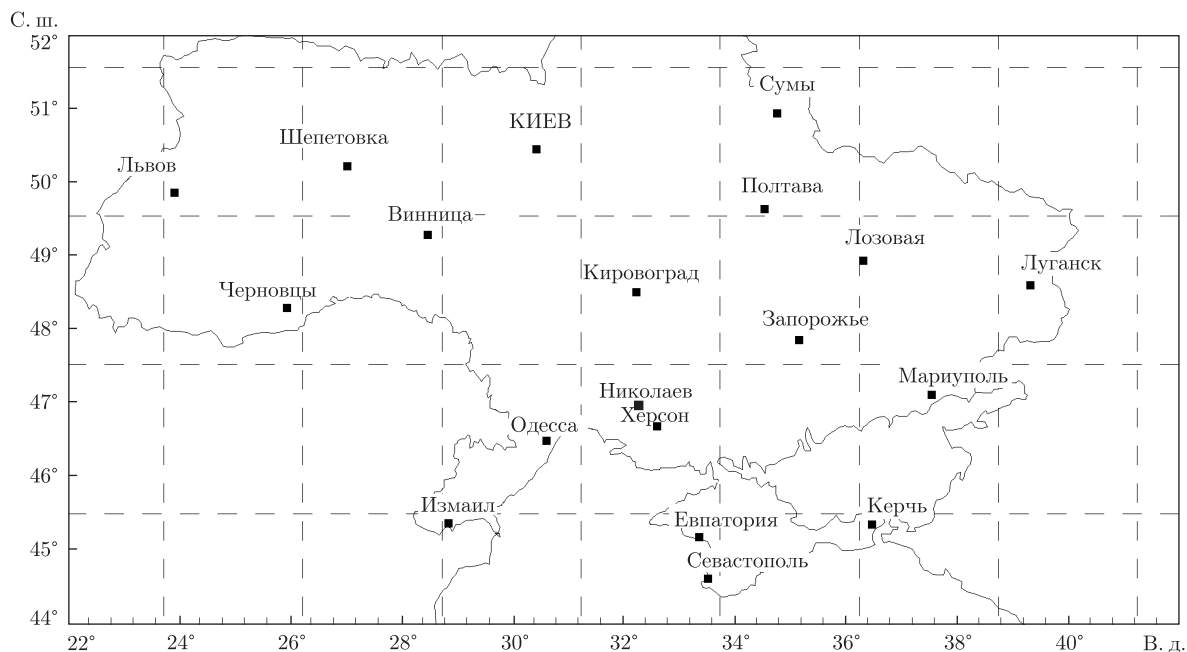


Рис. 1. Расположение метеостанций на территории Украины и расчетная сетка для модели GFDL CM-2.1

в г. Мариуполь и на ст. Лозовая (как максимально длинные). Смысл пространственного осреднения легко увидеть на рис. 1: расчетная точка модели попала практически посередине между несколькими точками наблюдений.

Количественный сравнительный анализ модельных и натуральных данных проводился с помощью сопоставления трендов температуры и расчета коэффициента корреляции между различными временными рядами. Коэффициенты корреляции между модельными и натурными данными рассчитывались как для самих среднемесячных значений исходных рядов температуры, так и для их среднемесячных аномалий. Для расчетов аномалий использовалась следующая методика: по всей длине анализируемого ряда определялись средние температуры по каждому из месяцев, затем эти значения вычитались из соответствующих значений модельных или натуральных рядов. Таким образом, из данных отфильтровывался сезонный ход температуры.

При первоначальном анализе исходных натуральных рядов и результатов расчета по модели GFDL для Крыма выяснилось, что уровень корреляции между ними составляет 0,90–0,95. Этот результат отражает преобладание в среднемесячных данных сезонного хода и хорошее его воспроизведение в модели. После перехода к аномалиям среднемесячных значений температуры уровень корреляции сравниваемых рядов значительно понизился (до 0,3–0,4). При этом коэффициенты корреляции между рассчитанными по натурным данным аномалиями остаются достаточно высоким: 0,82 — Севастополь–Феодосия, 0,83 — Феодосия–Керчь, 0,72 — Севастополь–Керчь. Близкие результаты получены также для 2-х наиболее длинных и непрерывных рядов наблюдений, которые относятся к метеостанциям, расположенным на ст. Лозовая (юг Харьковской области), в г. Мариуполь, и охватывают период 1900–2000 гг. Результаты расчетов показали наличие высокой корреляции между натурными среднемесячными данными для указанных пунктов наблюдения и результатов прогностической модели (0,95), а также низкую корреляцию для соответствующих аномалий. Пространственное

осреднение натуральных данных по этим двум точкам наблюдений не привело к существенному изменению результатов.

Дальнейший анализ проводился для пространственно осредненных исходных и модельных рядов в расчете на то, что, возможно, модели лучше описывают климатические тенденции осредненных по территории Украины характеристик. Такое осреднение производилось по всем имеющимся точкам наблюдений, так как используемые станции расположены достаточно равномерно по территории Украины. Таким образом, был получен обобщенный временной ход температуры для всего региона в целом за рассматриваемый период. Такой временной ряд удобно сравнивать с аналогичными рядами, полученными при осреднении модельных данных по тому же региону. Подобные осредненные ряды температуры были проанализированы также для центральной части Черноморского региона. Причем, для того чтобы выделить сезонные особенности в изменчивости температуры, мы выделили из рассматриваемых рядов отдельно январские и июльские реализации. Наиболее общими характеристиками, по которым можно проводить сравнение временного хода, являются средние температуры, наличие (отсутствие) линейного температурного тренда за указанный период и корреляция между аномалиями. Характеристики полученных трендов приведены в табл. 1, из которой видно, что ни одна из моделей полностью не воспроизводит тенденции временного хода температуры для двух рассмотренных регионов. Наилучший результат дает модель GFDL, которая неплохо описывает и среднюю по регионам температуру, и тенденции ее изменения. Ошибки в знаке для январских трендов по территории Украины зафиксированы в половине моделей, а для июльских — в трех из четырех. При этом эффект десезонализации климата (рост январских и уменьшение июльских температур), отмеченный для многих регионов [11, 12], не описывает ни одна из моделей. Корректное сравнение средних температур, к сожалению, провести нельзя из-за различного пространственного осреднения, вызванного различиями в расчетных сетках моделей. Похожие результаты наблюдаются и для центральной части Черного моря, несмотря на то, что здесь осреднение проведено по регулярной сетке.

Сравнения пространственно-временных структур исследуемых полей температуры было проведено для центральной части Черного моря — области максимально однородной по гидрометеорологическим условиям. В качестве основного метода описания указанной структуры данных использовался метод разложения полей по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ), предложенный Лоренцом (E. N. Lorenz, 1956). В результате его применения удастся разделить пространственную и временную составляющую исходных полей и выде-

Таблица 1. Тенденции измерений температуры для территории Украины (1945–1988 гг.) и центральной части Черного моря (1948–1999 гг.) для января и июля

| Источник данных | Январская температура, °С | | Июльская температура, °С | |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | Украина | Черное море | Украина | Черное море |
| Натурные и NCEP | $T = -4,50 + 0,080\Delta t$ | $T = 3,3 + 0,004\Delta t$ | $T = 21,30 - 0,020\Delta t$ | $T = 21,3 + 0,015\Delta t$ |
| Модель: | | | | |
| GFDL | $T = -4,70 + 0,030\Delta t$ | $T = 3,7 + 0,019\Delta t$ | $T = 21,34 - 0,001\Delta t$ | $T = 23,4 - 0,007\Delta t$ |
| HadCM-3 | $T = -8,86 + 0,048\Delta t$ | $T = 6,1 + 0,003\Delta t$ | $T = 19,60 + 0,037\Delta t$ | $T = 16,8 + 0,030\Delta t$ |
| ESCM | $T = -3,37 - 0,018\Delta t$ | $T = 7,2 - 0,019\Delta t$ | $T = 19,64 + 0,013\Delta t$ | $T = 21,1 - 0,002\Delta t$ |
| MIROC-3 | $T = -0,35 + 0,007\Delta t$ | $T = 8,2 - 0,007\Delta t$ | $T = 21,079 - 0,005\Delta t$ | $T = 25,4 - 0,002\Delta t$ |

Примечание. $\Delta t = 1$ ч.

лить базовую пространственную структуру поля температуры. В качестве алгоритма такого разложения для двухмерного (x, t) массива использовалось svd-разложение полученной двухмерной матрицы. Так как для каждой пространственной точки перед разложением из исходного ряда убирался линейный временной тренд, можно утверждать, что такой тип анализа пространственно-временной структуры поля температуры межгодового–десятилетнего масштаба является независимым дополнением к анализу трендов. Он характеризует главным образом естественную пространственно-временную изменчивость поля приземной температуры. Общая характеристика значимости первых шести ЭОФ, описывающих почти всю дисперсию температурных полей, приводится в табл. 2.

Преобладание первой моды как по данным ре-анализа NCEP, так и для модельных расчетов наиболее ярко выражено для января. Наиболее близкой к NCEP по процентному вкладу мод является модель HadCM-3. Для июля модовая структура более сложная и процентный вклад первой моды уменьшается для всех полученных результатов. Отметим, что при этом по данным ре-анализа NCEP он изменился меньше всего. Это означает, что летом воспроизводимость пространственно-временной изменчивости поля температуры в глобальных моделях в целом ухудшается (рис. 2). В январе пространственные структуры 1-х ЭОФ поля температуры, рассчитанных для моделей ECHAM, GFDL и по данным ре-анализа NCEP, близки между собой. Причем, особенность поля в северо-восточной части региона присутствует во всех полях (кроме HadCM-3). Для июля различия между моделями GFDL и ECHAM становятся принципиальными (обе модели хуже описывают пространственную структуру поля температуры, чем зимой). Временные коэффициенты 1-й ЭОФ для ре-анализа и прогностических моделей плохо коррелированы. Максимальные значения коэффициентов корреляции между ними не превышают 0,2–0,4. Причем они достигаются при модельных HadCM-3 NCEP, которые характеризуются большими различиями в пространственной структуре 1-й ЭОФ поля температуры.

Таким образом, проведенное сравнение в целом свидетельствует о невысоком качестве моделирования климатической изменчивости поля температуры на территории Украины и в Черноморском регионе. Несмотря на это, можно сделать некоторые позитивные выводы. Результаты расчетов пространственно-временной изменчивости полей температуры по четырем глобальным прогностическим моделям и данным ре-анализа NCEP/NCAR для центральной части Черного моря указывают на преобладание 1-й ЭОФ для обоих сезонов во всех расчетах. Ее вклад в суммарную дисперсию поля температуры зимой для всех анализируемых моделей превышает 80%, а летом — 60%. Причем для зимы пространственная структура первой моды по результатам прогностических расчетов больше соответствует наблюдениям, чем для лета. Лучше описываются и тенденции изменения средних темпера-

Таблица 2. Вклад первых шести мод ЭОФ в суммарную дисперсию поля температуры для января/июля за период 1948–1999 гг, %

| Источник данных | 1-я ЭОФ | 2-я ЭОФ | 3-я ЭОФ | 4-я ЭОФ | 5-я ЭОФ | 6-я ЭОФ |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | янв./июль | янв./июль | янв./июль | янв./июль | янв./июль | янв./июль |
| Модель: GFDL | 93,5/91,4 | 4,0/5,90 | 1,50/0,9 | —/— | —/— | —/— |
| MIROC | 93,5/88,4 | 3,9/5,20 | 1,54/3,8 | —/1,20 | —/0,64 | —/— |
| ECHAM | 92,6/88,3 | 4,5/6,10 | 1,75/1,8 | 0,51/1,67 | —/0,94 | —/0,41 |
| HadCM-3 | 87,0/60,3 | 7,9/19,68 | 2,90/8,3 | 1,35/5,40 | 0,35/3,40 | —/1,70 |
| Ре-анализ NCEP | 83,8/78,8 | 8,9/11,30 | 4,80/5,0 | 1,20/2,80 | 0,72/1,50 | —/0,29 |

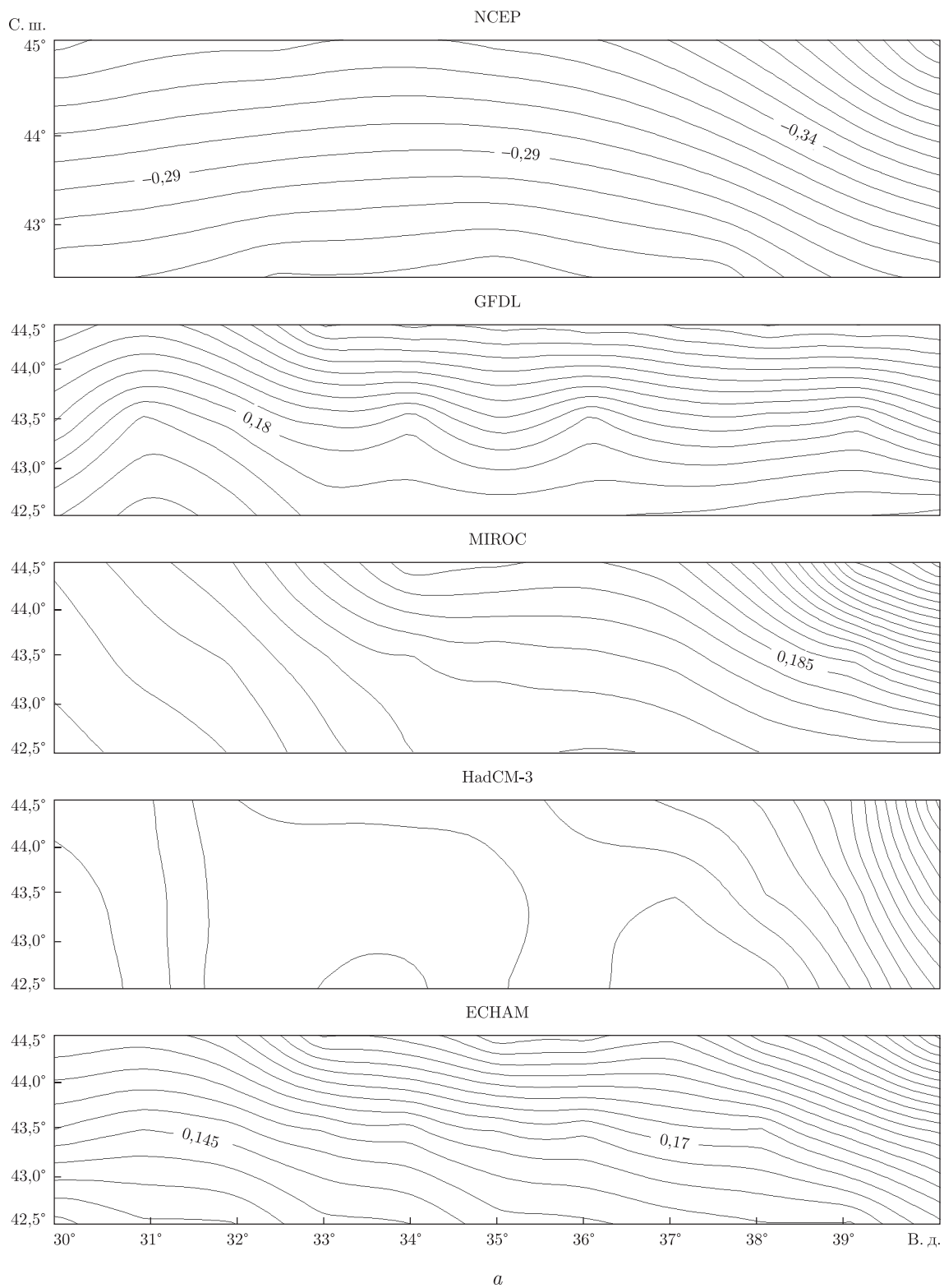
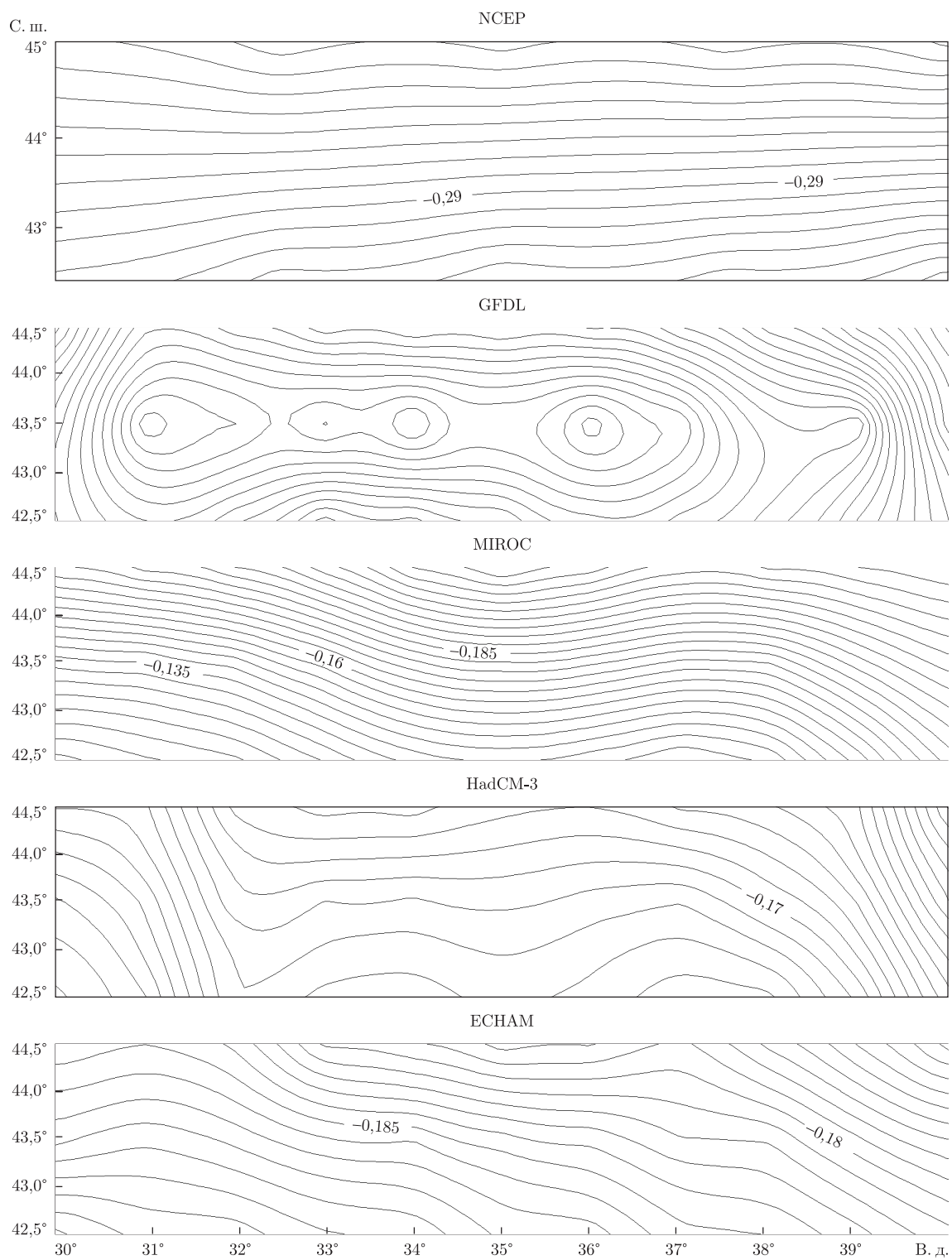


Рис. 2. Пространственная структура 1-й ЭОФ для января (а) и июля (б), рассчитанная по данным за период 1948–1999 гг.



б

Рис. 2. Продолжение

тур для январских данных, главным образом, моделью GFDL CM-2.1. Остается надеяться, что новое поколение моделей, разработанных в рамках проекта CMIP-5, даст в ближайшее время результаты расчетов, более соответствующие данным наблюдений.

1. <https://esg.llnl.gov:8443>.
2. http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/ipcc_model_documentation.php.
3. *Delworth T. L., Broccoli A. J., Rosati A. et al.* GFDL's CM2 global coupled climate models. Pt 1: Formulation and simulation characteristics // *J. Climate*. – 2006. – **19**, No 5. – P. 643–674.
4. *Gordon C., Cooper C., Senior C. A. et al.* The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments // *Climate Dynamics*. – 2000. – **16**, No 2./3. – P. 147–168.
5. *Pope V. D., Gallani M. L., Rowntree P. R., Stratton R. A.* The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model – HadAM3 // *Ibid.* – 2000. – **16**, No 2./3. – P. 123–146.
6. *JungCLAUS J. H., Keenlyside N., Botzet M. et al.* Ocean Circulation and Tropical Variability in the Coupled Model ECHAM5/MPI-OM // *J. Climate*. – 2006. – **19**, No 16. – P. 3952–3972.
7. <https://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/kyosei/hasumi/MIROC/tech-repo.pdf>.
8. *Van Oldenborgh G. J., Philip S. Y., Collins M.* El Nino in a changing climate: a multi-model study // *Ocean Sci.* – 2005. – **1**, No 2. – P. 81–95.
9. *Kistler R., Kalnay E., Collins W. et al.* The NCEP/NCAR 50-year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 2001. – **82**, No 2. – P. 247–267.
10. <http://www.cpc.noaa.gov/products/wesley/reanalysis.html>.
11. *Мелешко В. П., Мирвис В. М., Говоркова В. А.* Насколько наблюдения потепления климата России согласуются с расчетами по объединенным моделям общей циркуляции атмосферы и океана? // *Метеорология и гидрология*. – 2007. – № 10. – С. 5–19.
12. *Волощук В. М., Бойченко С. Г., Степаненко С. М. та ін.* Глобальне потепління і клімат України: регіональні екологічні та соціально-економічні аспекти. – Київ: ВПЦ “Київський університет”, 2002. – 117 с.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 30.05.2011

Член-корреспондент НАН України **О. Б. Полонський, О. С. Князьков**

Просторово-часова структура регіонального поля температури для регіону України та Чорного моря в глобальних кліматичних моделях

Проведено порівняння просторово-часової мінливості поля температури для регіону України та Чорного моря, розрахованого в глобальних кліматичних моделях GFDL CM-2.1 (США), HadCM-3 (Великобританія), MIROC-3.2 (Японія) і ECHAM-5 (Німеччина), з отриманим за даними гідрометеорологічних спостережень і за результатами ре-аналізу для другої половини ХХ ст. Встановлено, що часові тренди температури децю краще описуються моделлю GFDL CM-2.1, а просторово-часова структура першої емпіричної ортогональної моди — моделлю ECHAM-5. Відзначено, що результати моделювання для зими кращі, ніж для літа, хоча в цілому якість модельних розрахунків незадовільна.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. B. Polonsky, A. S. Knyazkov**

The spatial-temporal structure of a regional temperature field for the region of Ukraine and the Black Sea in global climate models

A comparison of spatio-temporal variabilities of the temperature field for the region of Ukraine and the Black Sea, calculated in global climate models GFDL CM-2.1 (USA), HadCM-3 (UK), MIROC-3.2 (Japan), and ECHAM-5 (Germany), and a field obtained by the data of hydrometeorological observations and the results of the re-analysis of the second half of the twentieth century is made. It is revealed that the temporal trends of temperature are somewhat better described by the GFDL CM-2.1, and the spatial-temporal structure of the leading empirical orthogonal mode by the ECHAM-5. In general, the simulation results for winters is better than for summers, although the overall quality of the model calculations is unsatisfactory.