

# ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА УКРАИНЫ В КОНЦЕ XXI СТОЛЕТИЯ

*А.Е. Анисимов*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: anisimov1@mail.ru

*Описывается численный эксперимент по составлению региональных проекций изменения климата Украины в конце XXI века с использованием региональной климатической модели HadRM3P. Рассмотрена методика оценки статистической значимости результатов. Подробно описываются результаты моделирования, приводятся иллюстрации изменений приземной температуры воздуха и интенсивности осадков для июля и января по сравнению с контрольным периодом.*

**Введение.** В настоящее время, когда изменения климата в связи с глобальным потеплением становятся всё более заметными в разных отраслях человеческой деятельности, возникает необходимость в улучшении оценок степени антропогенного воздействия на климат. Несмотря на то, что глобальные климатические модели (ГКМ) непрерывно совершенствуются, их пространственное разрешение по-прежнему слишком грубое, чтобы моделировать климат на региональных масштабах. Одним из способов уточнения грубых данных глобальных моделей является использование региональных климатических моделей.

В данной работе для составления сценариев изменения климата была использована региональная климатическая модель HadRM3P в рамках проекта PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies). Для составления региональных сценариев изменения климата использовался т.н. подход «временных интервалов». Идея эксперимента состоит в том, чтобы интегрировать РКМ на двух временных интервалах – на т.н. контрольном и сценарном периодах и рассчитывать изменение климата как разность между этими периодами. Аналогичный эксперимент, проведённый с ГКМ, описан в [1].

**Описание эксперимента.** Региональная система моделирования климата, использованная в этом эксперименте – PRECIS –

основана на ГКМ HadAM3N, разработанной в Met Office, Великобритания, которая, в свою очередь, является улучшенной версией атмосферной компоненты совместной глобальной модели HadCM3 [2]. Для работы региональной модели необходимы результаты расчёта глобальной модели, используемые в качестве граничных условий. В данном эксперименте используются данные из эксперимента с ГКМ HadAM3P. В качестве домена выбран регион, охватывающий всю территорию Украины, Чёрное море, Кавказ, Турцию и юг европейской части России, разрешение задавалось максимально допустимое -  $0.22^\circ \times 0.22^\circ$ .

Модель была интегрирована на контрольном и будущем периодах, которые соответствуют 1961–1990 и 2071–2100 гг. В случае будущего периода, состав атмосферы в РКМ задаётся аналогично ГКМ, в соответствии со сценарием эмиссий A2, представленном в третьем докладе IPCC (Международная группа экспертов по изменению климата). В качестве боковых граничных условий используются данные из ГКМ с шестичасовой дискретностью, которые интерполируются с грубой сетки ГКМ на т.н. «буферную зону» РКМ.

Начальные условия для почвы и атмосферы, т.е. состояние их внутри домена, также задаются из ГКМ. Для обоих периодов произведено три варианта интегрирования модели, образующих ансамбль реализаций. Отличие членов ансамбля состоит в разном задании начальных условий из соответствующего ансамбля реализаций ГКМ и, следовательно, и различных боковых граничных условиях. Этот шаг необходим для получения статистически более обоснованного результата, поскольку в силу внутренней модельной изменчивости в каждом из членов ансамбля воспроизводится своя траектория поведения климата.

Члены ансамбля интегрирования также различаются заданием значений SST (температура поверхности моря). Остановимся на этом вопросе подробнее. Для контрольного периода SST задаются согласно массиву данных HadISST 1.1 [3], восстановленному по данным наблюдений, и одинаковы для всех членов ансамбля. В качестве основы для SST будущего периода также берутся данные для контрольного 30-летнего периода из массива HadISST, однако с некоторыми модификациями. Во-первых, межгодовая изменчивость остаётся

такой же, как в HadISST. Во-вторых, к годовому ходу прибавляется величина, равная разности годовых ходов SST между будущим и контрольным периодами совместной глобальной модели HadCM3. Это позволяет учесть прибавку температуры, связанную с потеплением будущего климата, и, в то же время, избавиться от систематических ошибок, которые присутствуют в обоих периодах модельного счёта. Вычисление проводилось отдельно для каждого члена ансамбля, с данными из соответствующих членов ансамбля HadCM3. В-третьих, линейный тренд SST устанавливался равным тренду из HadCM3, также отдельно для каждого из членов ансамбля.

Наконец, отметим, что данные первых 12 месяцев эксперимента не учитываются при анализе, т.к. содержат погрешности, связанные с «разгоном» модели.

**Методика.** В следующем разделе даны описания проекций изменения регионального климата. Статистическая значимость в каждой точке рассчитывалась с использованием  $t$ -теста для двух выборок с неравными дисперсиями. Опишем методику, использовавшуюся при подсчёте значимости разности между будущим и контрольным ансамблями.

Построим сперва концептуальную модель для характеристики данных в каждом ансамбле. Пусть для контрольного периода

$$x_j = \mu + \varepsilon_j^x,$$

где  $x_j$  - смоделированная многолетняя средняя величина климатического параметра за выбранный месяц для члена ансамбля  $j=1, \dots, n$ ;  $\mu$  - компонент  $x_j$ , возникший вследствие интегрального многолетнего форсинга SST и изменявшегося на протяжении контрольного периода состава атмосферы;  $\varepsilon_j^x$  - компонент, обусловленный внутренней атмосферной изменчивостью из-за различных граничных условий [4].

Для будущего периода среднее значение климатического параметра можно описать как

$$y_j = \mu + \mu^f + \varepsilon_j^y,$$

где  $\mu^f$  - компонент, возникший вследствие средней по ансамблю разности контрольного и будущего SST-форсинга и состава атмосферы;  $\varepsilon_j^y$  - компонент, обусловленный, в данном случае, как внутренней изменчивостью, так и различиями SST

между членами ансамбля будущего периода.

Для проверки того, выделяется ли сигнал антропогенного воздействия на климат на фоне климатического шума, используем  $t$ -тест для проверки совпадения математического ожидания двух случайных величин с неравными дисперсиями. Рассмотрим величину

$$\bar{y} - \bar{x} = \mu^f + \varepsilon_j^y - \varepsilon_j^x.$$

Нулевая гипотеза состоит в том, что  $\bar{y}$  и  $\bar{x}$  равны, т.е.  $\mu^f = 0$ . Условием применимости  $t$ -теста является, помимо прочего, независимость выборок. Хотя  $x_j$  и  $y_j$  не являются независимыми в силу общей компоненты SST-форсинга, составленная модель позволяет перейти к  $\varepsilon_j^y$  и  $\varepsilon_j^x$ , и применить тест в предположении о том, что величины  $\varepsilon_j^y$  и  $\varepsilon_j^x$  независимы и распределены нормально. Соответствующая  $t$ -статистика

$$t = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)n}} = \frac{\varepsilon_j^y - \varepsilon_j^x}{\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)n}}$$

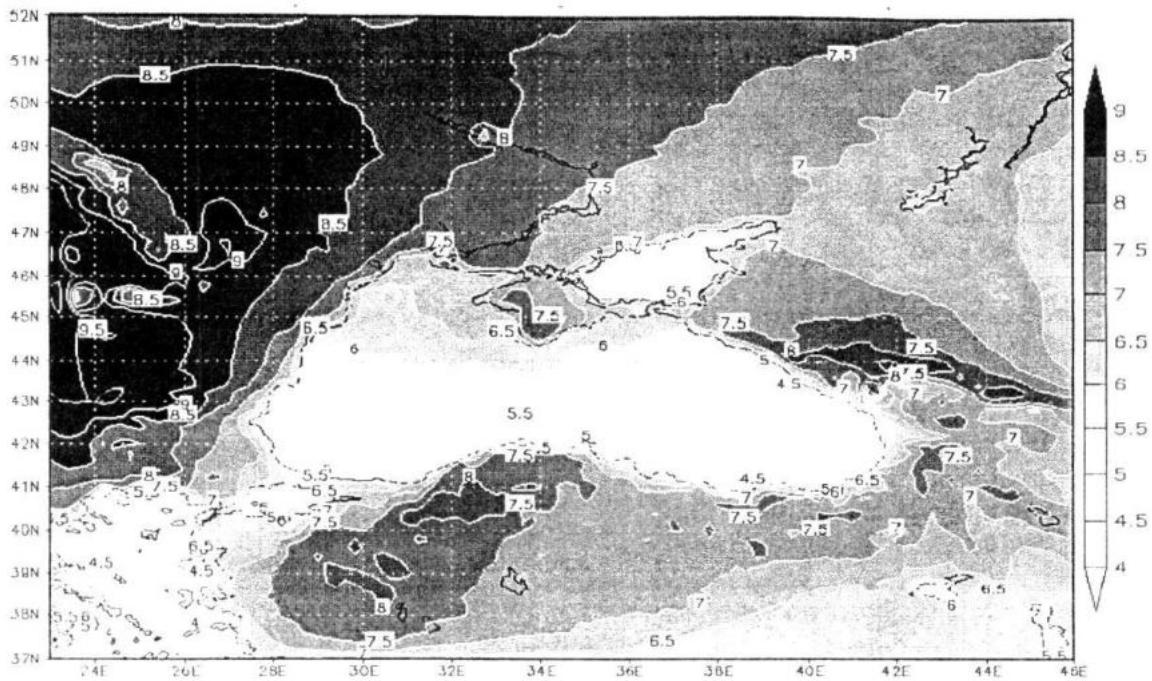
сравнивается с  $t$ -распределением Стьюдента, число степеней свободы которого для случая неравных дисперсий равно

$$\nu = (n-1) \frac{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^2}{\sigma_x^4 + \sigma_y^4} [5].$$

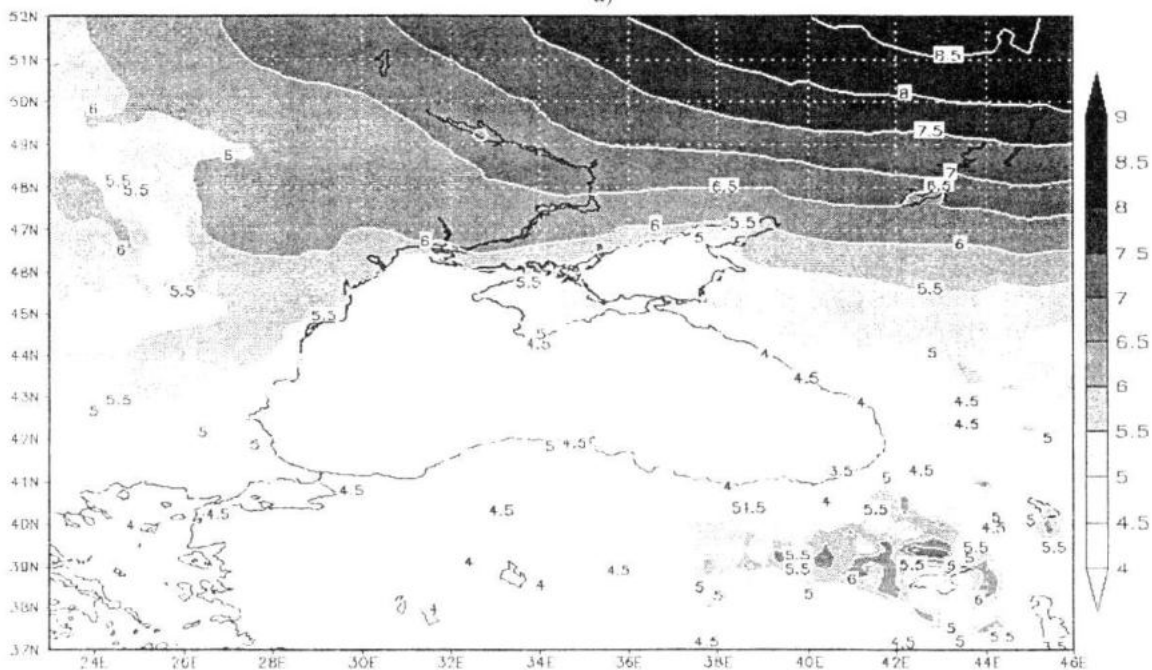
Отметим, что выбранные оценки можно улучшить за счёт составления полной модели случайных эффектов. Полученную в нашем случае оценку значимости можно считать оценкой сверху.

**Результаты.** Для двух месяцев – января и июля – приведены карты пространственного распределения разности средних по всем членам ансамбля многолетних значений приземной температуры и интенсивности среднемесячных осадков (будущий климат минус контрольный период). В каждой точке рассчитывалась статистическая значимость по приведённой в предыдущем разделе методике.

Напомним, что в данном численном эксперименте предполагается сценарий эмиссий A2, который отражает один из самых интенсивных прогнозов роста выбросов парниковых газов. Согласно сценарию, к концу XXI столетия концентрация углекислого газа в атмосфере будет составлять более 0,08 %, что более чем в два раза больше нынешних 0.038%.



а)



б)

Рисунок 1 – Проекция изменения приземной температуры воздуха, подсчитанные как разность между периодами 2071-2100 и 1961-1990 для а) июля; б) января. Значимость на уровне 10% соблюдается во всех точках области.

**Температура.** Изменение температурного режима для выбранного домена характеризуется значительным потеплением, как в летний, так и в зимний сезон, статистически значимым на уровне 10% во всех точках домена.

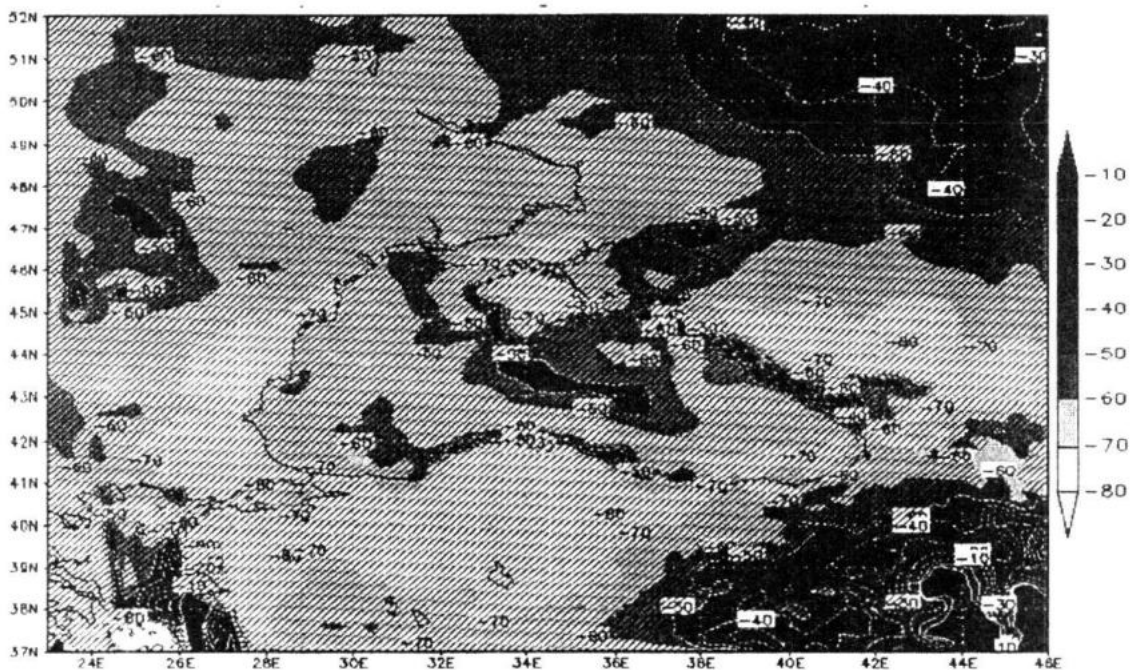
В июле наиболее выраженное повышение температуры отмечается в западной части домена, в некоторых областях свыше 9°C. Распределение температурных анома-

лий июля и других летних месяцев на территории Украины носит меридиональный характер, уменьшаясь с запада на восток. В Причерноморском регионе оценка степени потепления меньше, в пределах 7°C, что объясняется влиянием моря, которое выступает в роли стабилизирующего фактора. Над самим Чёрным морем потепление составит от 4.5°C в юго-восточной части до 7°C в северной. В

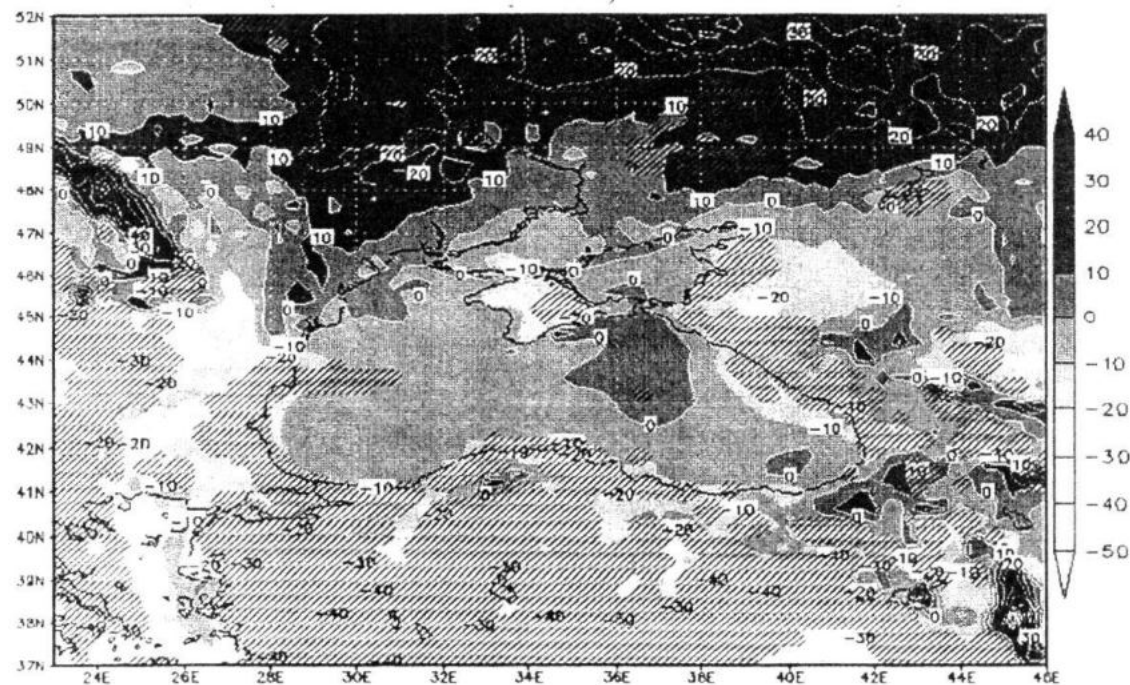
Малой Азии и в Закавказье модель показывает относительно равномерный рост температуры на 7-8°C.

В зимние месяцы оценки степени потепления более умеренные. В январе аномалии температуры в северной части домена имеют выраженное широтное распределение с максимумом на северо-востоке. Предположительно, это объясняется ослаблением эффекта обратной связи от высоко-

го альbedo снежного покрова в связи с резким (80-90%) уменьшением количества снежных масс. Эта обратная связь имела значительное влияние на формирование климата в этом регионе в контрольный период. На территории Украины изменения колеблются в пределах 5,5-6,5°C. В Турции и над Чёрным морем повышение температуры оценивается в пределах 4-5,5°C, лишь в высокогорных районах больше 6°C.



а)



б)

Рисунок 2 – То же, что на рисунке 1, но для аномалий интенсивности осадков, рассчитанных в процентном отношении к 1961-1990 для а) июля; б) января. Точки со значимостью 10% обозначены штриховкой.

**Осадки.** Изменения в режиме осадков в июле и январе не носят, в отличие от температуры, схожий характер. Лето, согласно модельным оценкам, станет гораздо более засушливым. На основной части Украины интенсивность осадков в июле снизится на 60%, а в Крыму – более чем на 70%. Отметим максимум уменьшения осадков в Краснодарском крае и на Северном Кавказе, где летние осадки уменьшаются на 70-80%. Примерно такую же оценку получаем для Турции.

Во всех вышеперечисленных областях изменения осадков оказываются значимыми. Незначимыми являются значения на юго-востоке и северо-востоке домена, где изменение осадков в будущий период оценивается в пределах 10-20%.

В январе картина распределения изменения интенсивности осадков имеет широтную изменчивость. Значимыми являются уменьшение осадков на 40-50% в Турции, с одной стороны, и увеличение осадков на 20-30% в северных частях домена. В Крыму и на юге Украины, в основном, модельная оценка осадков остаётся на прежнем уровне, и изменения значимыми не являются.

**Заключение.** Описан численный эксперимент по оценке региональных проекций изменения климата для периода 2071-2100 по сравнению с климатом контрольного периода 1961-1990. Использовалась региональная климатическая модель HadRM3P с разрешением  $0.22^\circ \times 0.22^\circ$ , уточняющая входные данные из грубой глобальной модели. Подход с использованием трёх членов ансамбля реализаций позволяет получить статистически более обоснованные результаты. Описана методика оценки значимости изменения значений климатических переменных.

В качестве основных результатов отметим, что в июле сценарная оценка степени потепления для территории Украины наиболее значительна, в районе  $7-9^\circ\text{C}$ , и  $4-5.5^\circ\text{C}$  для Турции. В январе потепление

несколько слабее и носит выраженное широтное распределение. Интенсивность осадков в июле сильно уменьшается, более чем на 70% в некоторых областях Украины, и ещё сильнее – на юге домена. Зимой моделируется значимое увеличение осадков для северных областей Украины - 20-30%, а в Турции осадки уменьшаются на 40-50%.

Отметим, что все приведённые оценки реализованы в предположении об интенсивных выбросах парниковых газов согласно со сценарием A2, который является одним из самых неблагоприятных с точки зрения влияния на окружающую среду.

## Л и т е р а т у р а

1. Rowell, D.P. A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability. *Clim Dyn.*, 25, 2005. – P. 837–849.
2. Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., Mitchell, J. F. B., and Wood, R. A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, 16, 2000. – P. 147–168.
3. Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., and Rowell, D. P. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, 108, 2003. – P. 201–222.
4. Kennett, E. J., Rowell, D. P., Jones, R. G., Buonomo, E. Robustness of Future Changes in Local Precipitation Extremes. *J. Clim.*, 21, 2007. – P. 4280–4297.
5. von Storch H, Zwiers FW. Statistical analysis in climate research. Cambridge University Press, 1999. Cambridge. – 484 p.