

А.О.Савченко

*Морской гидрофизический институт, г.Севастополь***ИЗМЕНЕНИЕ В ВЫХОЛАЖИВАНИИ СЕВЕРНОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ
В ЗИМНИЙ ПЕРИОД К КОНЦУ XXI СТОЛЕТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГЛОБАЛЬНОЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КЛИМАТА**

Представлены результаты эксперимента с увеличением концентрации парниковых газов к концу XXI ст. с использованием глобальной (HadAM3P) и региональной (HadRM3P) климатических моделей. Изменения климатических характеристик в зимнее время рассчитывали как разницу между контрольным периодом 1961 – 1990 гг. и периодом 2071 – 2100 гг. по сценарию A2. Отмечен тренд повышения климатических значений приземной температуры, который сопровождается изменениями средних и экстремальных величин явного и скрытого потоков тепла при выхолаживании северо-западного шельфа Черного моря в зимний сезон в будущем периоде (2071 – 2100 гг.).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черноморский регион, выхолаживание моря, экстремальные потоки тепла, изменение климата, моделирование климата*

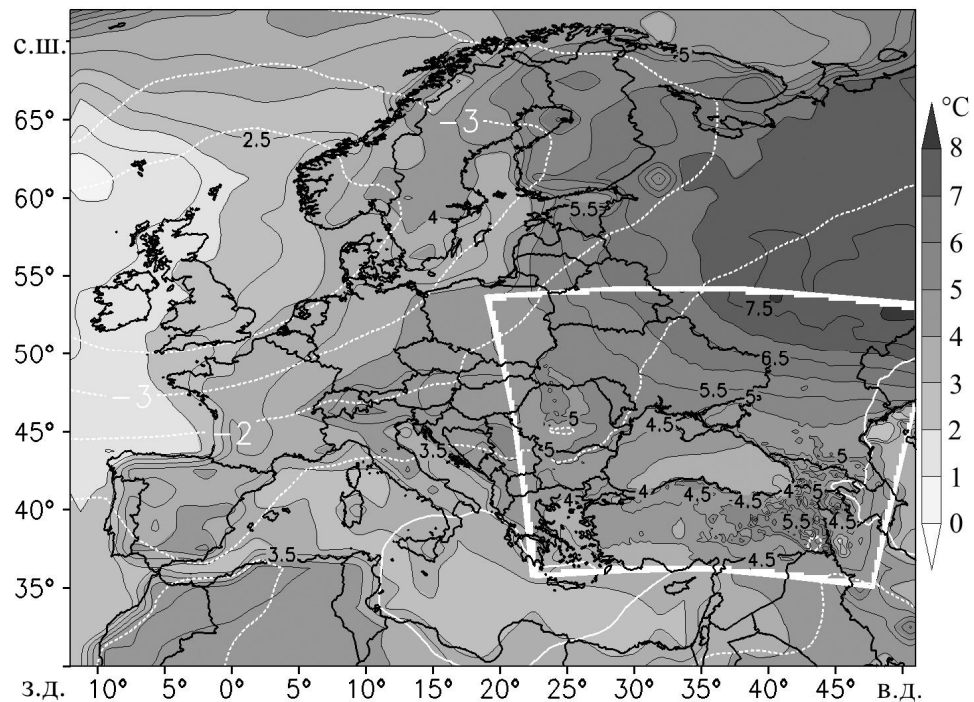
Изучение и моделирование климата является актуальной задачей современной геофизики, т.к. температура воздуха на Земле продолжает повышаться, и многие авторы связывают это с постоянно увеличивающейся антропогенной деятельностью на планете. В данное время существует большое количество климатических моделей, на основе которых получены проекции климата в XXI в. Так, по данным глобальных моделей потепление на планете к концу XXI в. составит 2 – 5 °С. В связи с этим возникает потребность в надежных и долгосрочных прогнозах для ряда секторов экономики, начиная от сельского хозяйства и промышленности вплоть до отрасли туризма. В то же время, пространственное разрешение глобальных моделей, несмотря на их постоянное усовершенствование, остается недостаточным для воспроизведения региональной атмосферной циркуляции. Так, разрешение глобальных климатических моделей составляет свыше 100 км. В данной работе использовалась «динамическая регионализация», т.е. один из способов уточнения данных глобальной модели, которая заключается в пересчете данных на более мелкую пространственную сетку при помощи гидродинамической модели атмосферной циркуляции. Таким образом, для области Причерноморья получили выходное разрешение 25 × 25 км. В последнее время появляется все большее число работ посвященных моделированию будущего климата [1 – 3], но Черноморский регион, как правило, остается мало исследован, т.к. находится на краю расчетной области, а иногда он и вовсе не попадает в пространственный домен. Поэтому задача данной работы, заключалась в том, чтобы исследовать потенциальную роль «глобального потепления» на зимнее выхолаживание северо-западной акватории Черного моря в конце столетия и уточнить грубые глобальные данные с помощью метода «регионализации».

Материал и методы. Для исследования зимнего выхолаживания северо-западной части Черного моря использовались массивы данных глобальной (HadAM3P) и региональной (HadRM3P) численных моделей климата в рамках проекта *PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies)*. Численный эксперимент заключался в регионализации входных данных глобальной атмосферной модели HadAM3P с пространственным разрешением входных данных $1,25 \times 1,875^\circ$, и получением выходного разрешения региональной модели HadRM3P с разрешением $0,22 \times 0,22^\circ$. «Регионализация» необходима для Черноморского региона в связи со сложной береговой линией и орографическими особенностями, т.е. наличием высоких Крымских, Кавказских и Понтийских гор, т.к. в существующих глобальных моделях Крымские горы фактически не учитываются, а Черное море задается десятком точек (узлов сетки). Поэтому важной задачей при исследовании Черноморского региона состояло в получении характеристик регионального климата, которые учитывают все эти региональные факторы [4]. Для построения проекций изменения климата нами использовался подход временных интервалов (*time-slice approach*). Изменение климатических характеристик рассчитывалось как разность их значений в двух модельных периодах по 30 лет. Климатические характеристики – это усредненные за 30 лет рассчитанные в модели погодные параметры, в данном случае, такие как приземная температура воздуха и давление на уровне моря. На первом этапе рассчитывалось развитие атмосферных процессов, т.е. текущая погода для так называемого контрольного периода – модель интегрировалась с заданными концентрациями парниковых газов и атмосферных аэрозолей, наблюдавшихся в 1960 – 1990 гг. Заметим, что данные за первый расчетный год контрольного периода (1960 г.) не учитывались в процессе анализа, т.к. считаются «разгоночными». Второй этап заключался в расчете развития атмосферных процессов для выбранного временного интервала XXI ст. [5]. Параметризационные схемы модели переформулируются с учётом изменения концентрации парниковых газов, а также эмиссии диоксида серы SO_2 , соответствующих специальному докладу *IPCC SRES (Special Report on Emissions Scenarios)* в 2071 – 2100 гг. Расчёты были выполнены для одного из самых неблагоприятных сценариев – A2. Выбор 30-ти летнего периода (2071 – 2100 гг.) климата обусловлен тем, что для этого периода соотношение между откликом климатической системы Земли на антропогенную нагрузку и погрешностями моделирования становится достаточным для надежного выделения полезного сигнала (отклика). Для первой половины XXI ст. величины изменений климата, связанные с антропогенным загрязнением, значительно выходят за рамки погрешностей, а также и природных естественных колебаний климата. Для контрольного периода и будущего сценария A2 проведена регионализация трех членов ансамбля глобальной модели. Отличие членов ансамбля состоит в разном задании начальных условий из соответствующего ансамбля реализаций глобальной модели 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 [6]. Т.о. в каждом из членов

ансамбля глобальной модели реализуется собственная крупномасштабная климатическая изменчивость, которая через граничные условия усваивается в региональной модели. Такой подход позволяет получить более устойчивые средние и экстремальные оценки характеристик климата.

Результаты. Рассмотрим более детально два основных климатических параметра: усредненную за 30-ти летний период температуру приземного воздуха и давление на уровне моря в Европе, с помощью метода «регионализации» в Черноморском регионе. Изменения температуры воздуха и давления на уровне моря рассчитывались как разность между будущим (2071 – 2100 гг.) и контрольным (1961 – 1990 гг.) периодами (рис.1).

Белой линией выделено проведенное наложение на глобальную картину изменения данных двух климатических параметров «регионализацию» Причерноморского региона (использовалась региональная модель HadRM3P, описанная выше). Изменение температуры воздуха характеризуется значительным потеплением в зимний (декабрь, январь, февраль) период времени. Так, увеличение температурного режима наименьшее над Британскими островами и составит около 2 °С, а наибольшее – над европейской частью России (7,5 °С), что может быть объяснено двумя механизмами. Первый – это то, что на морской климат западной Европы сильнее влияет более умеренное прогревание океана, а второй – это то, что в северной и восточной Европе отрицательная обратная связь снежного альбедо, которая помогает под-

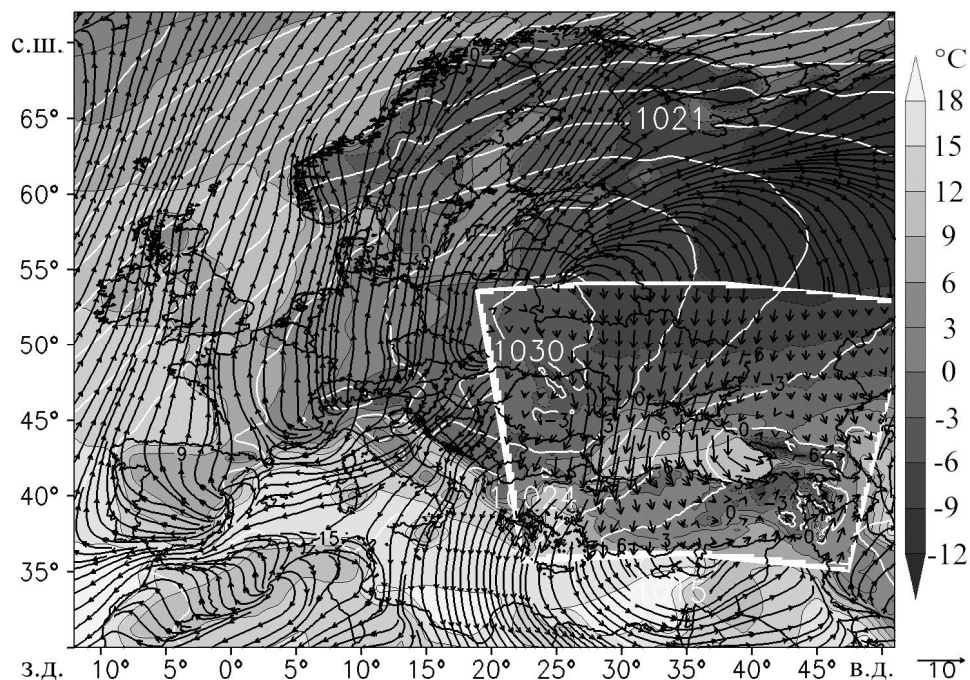


Р и с . 1 . Среднезимние поля приземного давления (гПа, белые изолинии и цифры) и приземной температуры воздуха (°С, цветом и черными цифрами), подсчитанные как разность между будущим (2071 – 2100 гг.) и контрольным (1961 – 1990 гг.) периодами.

держивать холодные зимние температуры в текущем климате, будет ослабевать и иметь меньшее влияние в будущем климате [5]. Также наблюдается наибольшее уменьшение среднезимнего давления над уровнем моря над Британскими островами, которое составит 4 гПа. В Причерноморском регионе потепление составит 4,5 – 5,5 °С, что объясняется влиянием моря, которое выступает в роли стабилизирующего фактора. Над акваторией моря повышение температуры воздуха составляет 3,5 – 4 °С на юге и 4 – 4,5 °С на севере. Изменчивость термохалинных характеристик деятельного слоя Черного моря в зимний период напрямую связано с атмосферным выхолаживанием [7]. Так, наиболее интенсивное зимнее выхолаживание поверхности моря происходит в периоды вторжения масс холодного воздуха через северную границу. Выхолаживание моря в зимний период максимально в северо-западной части, которая в свою очередь представляет собой мелководную шельфовую часть моря, наиболее подверженную влиянию атмосферных процессов, речного стока и антропогенных нагрузок. Так, в акваторию шельфа поступает около 80 % суммарного речного стока в Черное море [8], поэтому основное внимание будет уделено этому району. Приведенные далее интегральные характеристики явного, скрытого потоков тепла, а также их суммы (далее суммарный поток тепла) северо-западной шельфовой акватории Черного моря относятся к области моря, ограниченной 44 – 47° с.ш., 28 – 34° в.д. Радиационные потоки, которые также вычислялись в модели, не рассматривались, так как в зимний период радиационный баланс мал ($\approx 10 - 20 \text{ Вт/м}^2$) и для нашей цели – анализа процессов экстремального выхолаживания – ими можно с уверенностью пренебречь. Т.о. описываемый далее суммарный поток тепла будет равен сумме значений явного и скрытого потоков тепла над выбранной акваторией. В зимний сезон будущего периода времени наблюдается уменьшение средней величины суммарного потока для северо-западного шельфа моря, которое составит $\approx 4 \text{ Вт/м}^2$. В будущем периоде наблюдается уменьшение явного потока тепла и увеличение скрытого потока тепла, причем уменьшение явного потока тепла будет практически полностью компенсировано увеличением скрытого потока тепла, это напрямую связано с изменением температурных контрастов суши-моря. Причиной появления завихренности в пограничном слое атмосферы в прибрежной западной части Черноморского региона являются прибрежные температурные контрасты между морем и сушей, а такие температурные контрасты могут вызывать антициклоническую циркуляцию в прибрежной зоне, что объясняет наблюдаемые там большие абсолютные величины явного потока тепла. В прибрежных западных частях моря зимой в контрольном периоде они достигают 4 – 6 °С, особенно в прибрежной области (42 – 44° с.ш.), а с увеличением температуры приземного воздуха в будущем температурные контрасты уменьшаются вследствие чего будет уменьшаться и величины явного потока тепла [6], в то же время обратному увеличится испарение с морской поверхности. Т.о. уменьшится вклад явного потока тепла в среднюю величину суммарного потока тепла с 38 % в контрольном периоде до 28 % в будущем и соответственно увеличится вклад скрытого потока тепла с 62 до 72 % для исследуемой акватории в зимний сезон. Далее были рассмотрены изменения экстремальных потоков тепла в контрольном

и будущем периодах на межсуточных масштабах, т.к. дни с экстремальными потоками тепла (брался суммарный поток тепла), имеющие малые периоды повторяемости и большие величины $P(Q)$, дают относительно больший вклад в выхолаживание морской поверхности в зимний сезон. Так, например, дни с экстремальными потоками $P(Q) = 95\%$ (число которых составляет 5 % от общего числа дней) дают вклад $\approx 18\%$ в суммарный поток тепла и в контрольном, и в будущем зимних периодах. При анализе интегральных характеристик шельфовой акватории видно, что в будущем периоде уменьшается доля явного потока с 49 до 38 % и увеличивается доля скрытого потока с 51 до 62 % в суммарном экстремальном потоке тепла по сравнению с контрольным периодом. Чтобы определить атмосферную ситуацию Черноморского региона, при экстремальном выхолаживании северо-западной шельфовой зоны, были построены композиты осредненных синоптических ситуаций ($\approx$ по 400 полей) с экстремальными потоками тепла для контрольного и для будущего периодов превышающих пороговое значение $P(Q) = 95\%$, по данным глобальной (HadAM3P) и региональной (HadRM3P) моделей. Наложение расчетов региональной модели на картину глобальной термобарической ситуации при зимнем выхолаживании было произведено так же, как и со среднезимними значениями температуры и давления (рис.1). Анализ композита для контрольного периода показал, что при экстремальном выхолаживании моря в зимний период характерной особенностью является наличие области антициклона, центр которого располагается северо-западнее Черного моря. Северный поток холодного воздуха с большими скоростями приповерхностного ветра приводит к образованию экстремальных суммарных потоков тепла на морской поверхности. Не приводя иллюстраций композита контрольного периода, отметим, что структура барических полей для выбранных экстремальных дней близка к построенному композиту для будущего периода (рис.2). Интересно то, что с увеличением температурного режима в Причерноморье на $\approx 4,5 - 5^\circ\text{C}$ и изменением доли явного и скрытого потоков тепла в суммарном экстремальном потоке синоптическая ситуация, способствующему сильному экстремальному выхолаживанию, не изменится, а главным элементом композита будущего периода также остается антициклон в районе Карпатских гор.

Выводы. С использованием глобальной и региональной климатической модели был выполнен численный эксперимент по оценке региональных проекций изменения климата для периода 2071 – 2100 гг. по сравнению с климатом контрольного периода 1961 – 1990 гг. Цель эксперимента заключалась в том, чтобы с использованием региональной климатической модели HadRM3P с разрешением $0,22 \times 0,22^\circ$, уточнить входные данные грубой глобальной модели. Примененный подход с использованием трёх членов ансамбля реализаций позволил получить статистически более обоснованные результаты. Из фактических результатов получили, что в будущем увеличение температурного режима в Причерноморье составит $\approx 4,5 - 5^\circ\text{C}$, а доля явного потока уменьшится с 49 до 38 % и увеличится доля скрытого потока с 51 до 62 % в суммарном экстремальном потоке тепла в будущем по сравнению с контрольным периодом. Но с изменением данных характеристик синоптическая ситуация, способствующая сильному экстремальному выхола-



Р и с . 2 . Композиты полей приземной температуры воздуха (°C, цветом и черными цифрами), приземного давления (гПа, белые изолинии и цифры) и векторов скорости ветра на 10 м (стрелки и черные линии) для вероятности событий экстремального выхолаживания в северо-западной части моря Р = 95 % в зимний сезон будущего (2071 – 2100 гг.) периода.

живанию, не изменится, а главным элементом композита будущего периода также остается антициклон в районе Карпатских гор, а сильный северо-восточный поток холодного приповерхностного ветра, который, также как и в контрольном периоде, приводит к образованию экстремального выхолаживания на морской поверхности. Отметим, что все приведённые оценки выполнены с предположением об интенсивных выбросах парниковых газов к концу XXI в. согласно одному из самых неблагоприятных для окружающей среды сценария А2.

Благодарности. Работа выполнена с использованием программного обеспечения *PRECIS*, предоставленного *Met Office Hadley Centre* (Великобритания).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anagnostopoulou CHR., Tolika K., Maheras P. et al.* Performance of the general circulation HadAM3P model in simulating circulation types over the Mediterranean region // *Int. J. Climatol.*– 2008.– № 28.– P.185-203.
2. *Feldmann H., Schadler G., Panitz H-J. et al.* Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations // *Int. J. Climatol.*– 2013.– № 33.– P.1964-1977.
3. *Önol B., Semazzi F.H.M.* Regionalization of Climate Change Simulations over the Eastern Mediterranean // *J. Climate.*– 2009.– № 22.– P.1944-1961.

4. *Ефимов В.В., Иванов В.А., Анисимов А.Е.* Численное моделирование изменения климата Украины в XXI веке // Доп. НАН України.– 2011.– № 3.– С.100-107.
5. *Rowell D.P.* A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability // *Clim. Dyn.*– 2005.– № 25.– Р.837-849.
6. *Анисимов А.Е.* Численное моделирование климатической изменчивости Черноморского региона: дисс. ... канд. физ.-мат. н.– Севастополь: МГИ НАНУ, 2012.– 155 с.
7. *Пиотух В.Б., Зацепин А.Г., Казьмин А.С. и др.* Реакция термохалинных характеристик деятельного слоя Черного моря на зимнее выхолаживание // *Океанология.*– 2011.– 51, № 2.– С.1-10.
8. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: в 10 т. Т.4. Черное море.*– СПб.: Гидрометеоздат, 1991.– 430 с.

Материал поступил в редакцию 27.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ Представлені результати експерименту зі збільшенням концентрації парникових газів до кінця XXI ст. з використанням глобальної (HadAM3P) і регіональної (HadRM3P) кліматичних моделей. Зміни кліматичних характеристик в зимовий час розраховували як різницю між контрольним періодом 1961 – 1990 рр. і періодом 2071 – 2100 рр. за сценарієм A2. Підкреслене значення тренда підвищення кліматичних значень приземної температури, яке супроводжується змінами середніх та екстремальних значень явних та прихованих потоків тепла при зимовому вихолодженні північно-західного шельфу Чорного моря в майбутньому періоді (2071 – 2100 рр.).

ABSTRACT Numerical experiments on assessing the regional climate projections for the Black sea region at the end of the XXI century under anthropogenic contamination of the atmosphere are examined, by using HadAM3P and HadRM3P climate models. Climate changes are estimated as the difference between 1961 – 1990 control period and the future 2071 – 2100 climate under A2 scenario of the emission of greenhouse gases in winter season. The trend of increase of the global temperature is marked, that is accompanied by the changes of average and extreme values sensible and latent heat fluxes at cooling of north-western shelf of the Black sea in winter seasons in the future period (2071 – 2100).