

А.О.Савченко

*Морской гидрофизический институт, г.Севастополь***ИЗМЕНЕНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ ВЫХОЛАЖИВАНИИ
СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ШЕЛЬФОВОЙ АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ
В ЗИМНИЙ ПЕРИОД В КОНЦЕ XXI ВЕКА**

Представлены результаты численного эксперимента по составлению региональных проекций изменения климата Причерноморского региона в конце XXI в. с использованием региональной климатической модели *HadRM3P*. Описываются результаты моделирования, приводятся иллюстрации пространственного распределения изменений явных, скрытых потоков тепла для зимнего сезона в конце XXI в. по сравнению с контрольным периодом. Рассматриваются типичные синоптические ситуации, соответствующие экстремальному зимнему выхолаживанию северо-западной шельфовой акватории Черного моря, а также их изменения к концу столетия.

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

В настоящее время развиваются методы и методики, как для краткосрочного прогноза погоды, так и для прогноза климата в конце XXI в. На основе т.н. глобальных климатических моделей был детально изучен климат XX ст. и получены проекции изменения климата в XXI в. В частности, утверждается, что положительный тренд приземной температуры воздуха, который наблюдается с середины XX в., в значительной степени обусловлен увеличением концентрации парниковых газов и аэрозолей в атмосфере, связанных с увеличивающейся антропогенной деятельностью на планете. Причем, по данным этих глобальных моделей, потепление на планете к концу XXI в. составит 2 – 5 °С, что не может не отразиться как на хозяйственной деятельности и быте человека, так и на флоре и фауне нашей планеты. В то же время, пространственное разрешение глобальных моделей, несмотря на их постоянное усовершенствование, остается недостаточным для воспроизведения региональной атмосферной циркуляции. Одним из способов уточнения грубых данных глобальных моделей является т.н. динамическая регионализация (*dynamical downscaling*). Она состоит в пересчете данных на более мелкую пространственную сетку при помощи региональной гидродинамической модели атмосферной циркуляции. Под «региональными» мы будем подразумевать процессы масштаба от 10 до 100 км. Разрешение глобальных моделей составляет свыше 100 км. Хотя в последнее время появляется все большее число работ [1, 2], посвященных региональным проекциям изменения климата в Европе, Черноморский регион, как правило, остается мало исследован по причине того, что находится на краю расчетной области, а иногда он и вовсе не попадает в пространственный домен. В то же время необходимость таких исследований очевидна, как по экологическим, так и по экономическим мотивам.

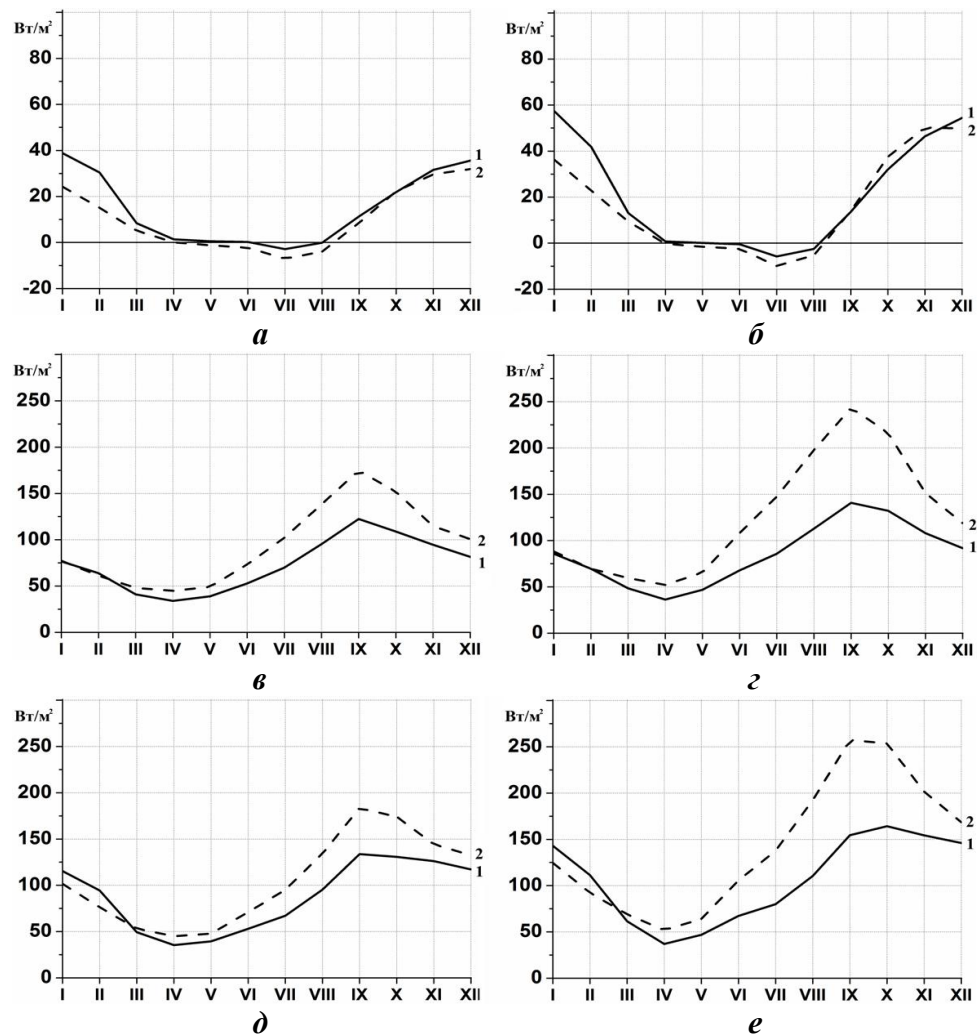
Описание эксперимента. Для изучения изменения процессов в буду-

© А.О.Савченко, 2014

щем, обуславливающих выхолаживание шельфовой акватории Черного моря, в данной работе 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 $1,25 \times 1,875^\circ$. Таким образом, получили выходное разрешение 25×25 км [3]. 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 явные и скрытые потоки тепла. 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 1961 – 1990 гг. Второй этап заключался в расчете развития атмосферных процессов для выбранного временного интервала XXI ст. Параметризационные схемы модели переформулируются с учётом изменения концентрации парниковых газов (углекислого газа, метана и др.), 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-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 более ранних периодов (первая половина XXI ст.) величины изменений климата связанные с антропогенным загрязнением, незначительно 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. Различие между ними состоит в начальных условиях. 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 [4]. 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.

Пространственно-временная изменчивость. Наибольшие значения, т.е. максимальное выхолаживание, приходится на северо-западный шельф Черного моря, который представляет собой мелководную часть моря, наиболее подверженную влиянию атмосферных процессов, речного стока и

антропогенных нагрузок. В акваторию шельфа поступает около 80 % суммарного речного стока в Черное море [5], поэтому основное внимание будет уделено этому району. Приведенные далее интегральные характеристики северо-западной шельфовой акватории Черного моря относятся к области моря, ограниченной 44 – 47° с.ш., 28 – 34° в.д. Выхолаживание моря в зимний период максимально в мелководной северо-западной части, где, например, формируется такая интересная особенность термохалинной структуры, как холодный промежуточный слой. Поэтому рассмотрим годовой ход потоков тепла (рис.1), осредненных по всей поверхности Черного моря и по северо-западной шельфовой акватории моря для контрольного 1961 – 1990 гг. и для будущего 2071 – 2100 гг. периодов. Напомним, что в данном числен-

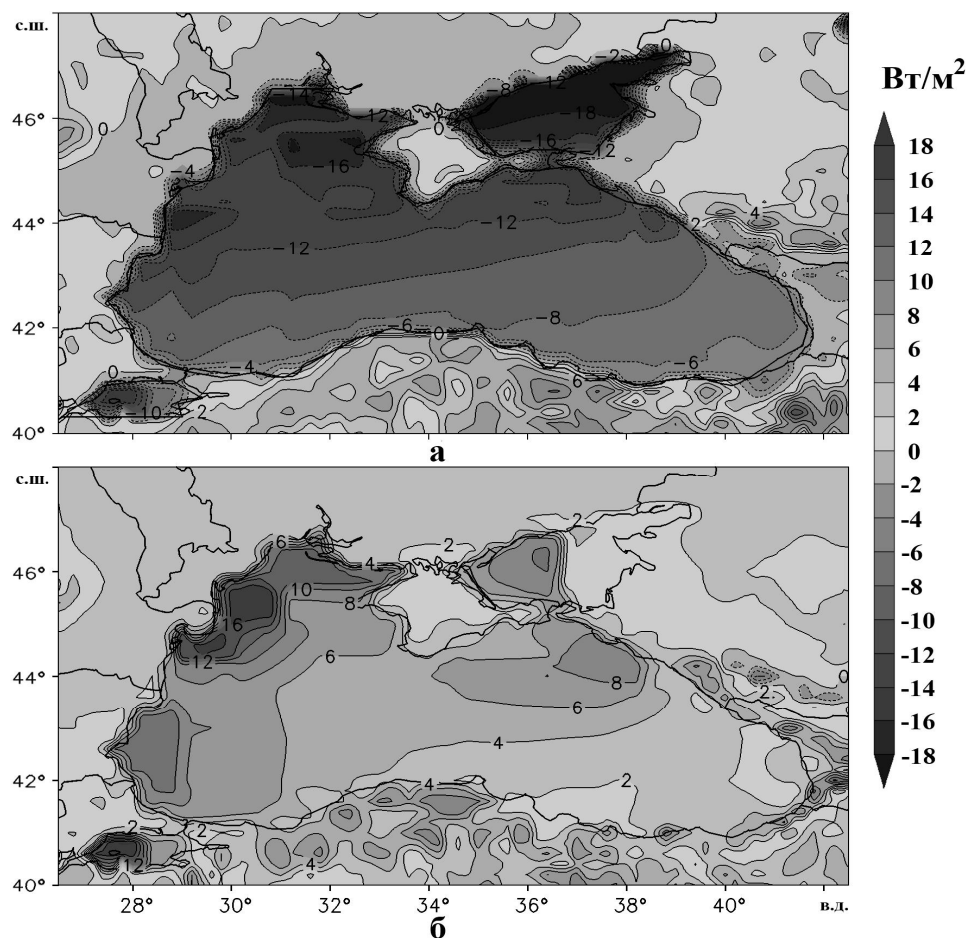


Р и с . 1 . Годовой ход потоков тепла (Вт/м^2) в 1961 – 1990 гг. (1) и 2071 – 2100 гг. (2) для явных (а, б) и скрытых (в, г) потоков тепла и их суммы (д, е), осредненных по всей поверхности Черного моря (а, в, д) и по северо-западной шельфовой акватории моря (б, г, е).

ном эксперименте предполагается сценарий эмиссий А2, который отражает один из самых интенсивных прогнозов роста выбросов парниковых газов.

Приведены значения явного потока тепла (рис.1, *а, б*), скрытого потока тепла (рис.1, *в, г*), а также их суммы (рис.1, *д, е*), дальше суммарный поток тепла (Q), для контрольного и будущего периодов осредненных по всей поверхности моря и по северо-западной акватории соответственно. На приведенных годовых циклах величин потоков тепла, осредненных по площади моря, видно увеличение суммарного потока тепла (рис.1, *д, е*) во все месяцы года, кроме января и февраля, как для всего моря, так и для северо-западной шельфовой части. Это происходит благодаря увеличению скрытого потока тепла (рис.1, *в, г*) во все месяцы года связанного с глобальным повышением температуры, увеличивающей температурные контрасты между атмосферой и морем. В то же время явный поток тепла (рис.1, *а, б*) в будущем периоде, наоборот, уменьшается практически по всем месяцам года. Для черноморского бассейна характерна значительная неоднородность распределения поверхностных потоков тепла по акватории моря. С этой целью были построены и проекции изменения пространственного распределения явного и скрытого потоков тепла между будущим и контрольным периодами (рис.2).

Показано (рис.2) зимнее изменение средних величин явного и скрытого потоков тепла между будущим и контрольным периодами, где уменьшение явного потока тепла будет практически полностью компенсировано увеличением скрытого потока тепла. Таким образом, (рис.1, *а – е*) 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. В то же время уменьшение средней величины суммарного потока тепла в зимний сезон для северо-западного шельфа моря в будущем периоде составит достаточно малое значение $\approx 4 \text{ Вт/м}^2$. Далее рассмотрим изменение экстремальных потоков тепла в будущем периоде на межсуточных и межгодовых масштабах, т.к. дни с экстремальными потоками 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. Чтобы определить атмосферную ситуацию Черноморского региона, при экстремальном выхолаживании северо-западной шельфовой зоны, были построены композиты осредненных ≈ 400 барических полей с экстремальными потоками тепла для контрольного и для будущего периодов превышающих пороговое значение $P(Q) = 95 \%$, по данным глобальной модели *HadAM3P* (которые использовались ранее в качестве входных данных для региональной модели). Не приводя иллюстраций, отметим, что данный анализ композитных полей при экстремальном выхолаживании моря в зимний период как для контрольного, так и для будущего периодов показал, что характерной особенностью барических полей является наличие области антициклона, центр которого располагается северо-западнее Черного моря.



Р и с. 2. Проекция изменения пространственного распределения в зимний сезон явного (*а*) и скрытого (*б*) потоков тепла (Вт/м^2), подсчитанные как разность между периодами 2071 – 2100 и 1961 – 1990 гг.

Северный поток холодного воздуха с большими скоростями приповерхностного ветра приводит к образованию экстремальных суммарных потоков тепла на морской поверхности.

Чтобы определить изменения в атмосферной ситуации для дней с экстремальными потоками тепла в северо-западной акватории, был проведен кластерный анализ экстремальных барических полей для контрольного и будущего периодов. В качестве входных условий использовались данные глобальной модели *HadAM3P* с пространственным разрешением $\approx 1,25 \times 1,875^\circ$ для переменной давления на уровне моря, примененных к области $35 - 65^\circ\text{с.ш.}$, $5 - 55^\circ\text{в.д.}$ Для всех зимних дней из трех членов ансамбля контрольного и будущего периодов были выбраны дни с экстремальным выхолаживанием превышающих пороговое значение $P(Q) = 95\%$, после чего их разделяли на кластеры. В [6] приведено подробное описание проведения кластерного анализа, только вместо переменной давления на уровне моря использовалась переменная геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа. Кластеризация, осредненных полей для контрольного и для будущего периодов, позво-

лила представить неоднородные данные композита в наглядном виде и исследовать по отдельности каждый кластер (синоптическую ситуацию). В данном случае применялся взвешенный метод кластерного анализа, рассчитанный через евклидово расстояние в программе *Matlab* [7]. Ниже приведена формула, по которой происходил расчет, евклидова расстояния между полученными векторами-строками ($x_1, x_2 \dots x_m$).

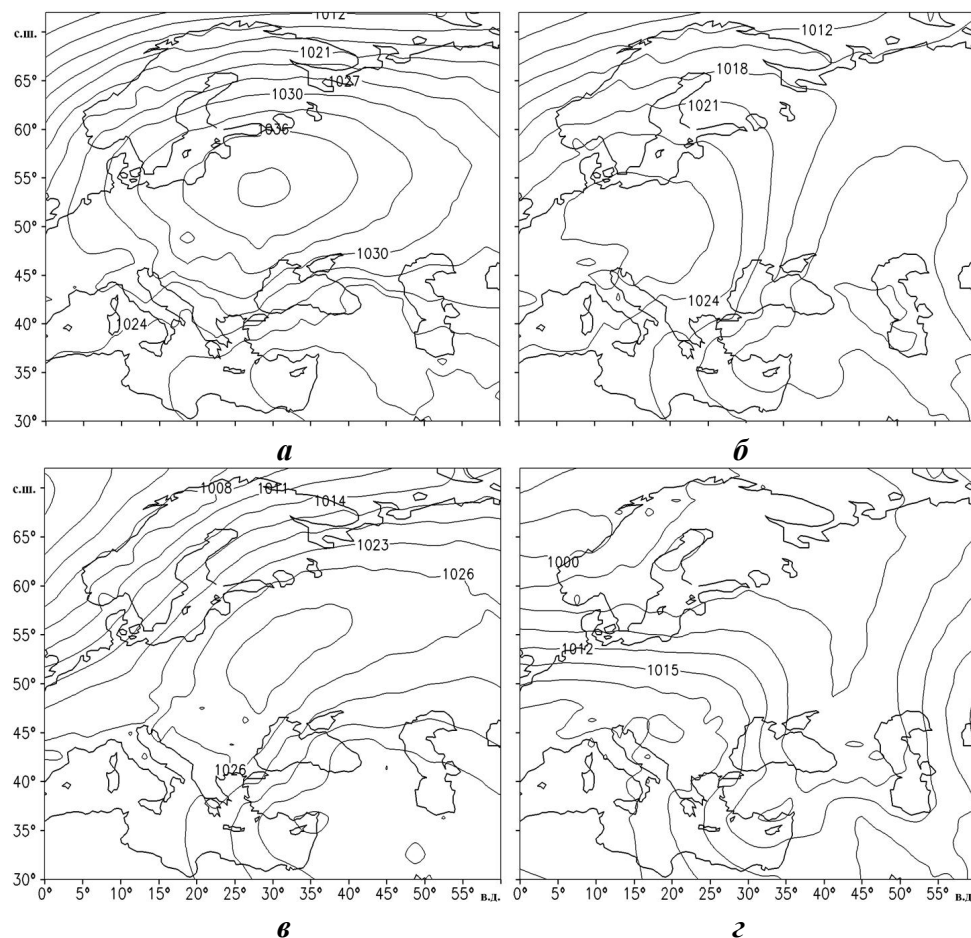
$$d_{12}^2 = (x_1 - x_2) \cdot (x_1 - x_2),$$

где d_{12}^2 – евклидово расстояние между вектором-строкой x_1 и x_2 ; $x_1, x_2, \dots x_m$ – векторы-строки вычисленных значений давления на уровне моря в каждом узле выбранной области m экстремальных событий.

Таким образом, происходило вычисление евклидова расстояния между x_1 и x_2 , x_1 и x_3 , x_1 и x_m , ... x_{m-1} и x_m и получение $(m - 1)/m/2$ значений. После чего выбирался взвешенный метод кластеризации, и происходило разделение экстремальных событий $P(Q) = 95$ % на оптимальное количество кластеров. В данном случае оптимальным оказалось 4 кластера, которые включают в себя 98,6 % всех экстремальных событий, а остальные 1,4 % событий не вошли ни в один из 4 приведенных ниже кластеров. Ниже (рис.3) показаны 4 типичные синоптические ситуации (кластеры), соответствующие экстремальному выхолаживанию в зимний сезон для контрольного (1961 – 1990 гг.) и будущего (2071 – 2100 гг.) периодов.

Представленные (рис.3) 4 типа синоптических ситуаций подтверждают описанное выше, что поток холодного воздуха с большими скоростями приповерхностного ветра вторгается через северную границу Черного моря и приводит к образованию экстремальных суммарных потоков тепла на северо-западной морской поверхности. I тип (рис.3, а) синоптической ситуации в контрольном периоде составляет ≈ 44 % всех экстремальных событий, а в будущем доля уменьшится до 28,1 %. II тип (рис.3, б) синоптической ситуации в контрольном периоде составляет 33,6 % всех экстремальных событий, а в будущем доля увеличится до 39,2 %. III тип (рис.3, в) синоптической ситуации в контрольном периоде составляет 15,5 % всех экстремальных событий, а в будущем доля увеличится до 27,4 %. IV тип (рис.3, г) синоптической ситуации как в контрольном, так и в будущем периоде составляет 5,5 %. Таким образом, значительные долевого изменения в будущем претерпят I и III типы синоптической ситуации, которые между собой сходны наличием антициклона на северо-западе от акватории Черного моря, а во II и в IV типе, которые между собой сходны наличием антициклона в районе Карпат и циклона на востоке от Черного моря, значительных долевого изменений не произойдет. 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 в будущем по сравнению с контрольными периодами.

Заключение. Динамическая регионализация является основным инструментом для изучения региональных климатических процессов. Оценка экстремальных явлений погоды в настоящем времени и возможных изменений, связанных с антропогенным воздействием, представляет собой важней-



Р и с . 3 . Типовые барические поля (в гПа) при экстремальном выхолаживании моря для контрольного (1961 – 1990 гг.) и будущего (2071 – 2100 гг.) зимних периодов.

шую задачу. Описанные результаты численных экспериментов позволили получить предварительные оценки таких изменений. В результате проведенных расчетов рассмотрены климатические особенности северо-западной шельфовой акватории в экспериментах с измененной концентрацией парниковых газов по сравнению с контрольным периодом, соответствующим текущему состоянию атмосферы. Были построены проекции изменения пространственного распределения явного и скрытого потоков тепла в зимний сезон, подсчитанные как разность между периодами 2071 – 2100 гг. и 1961 – 1990 гг., а также 4 типовые барические карты, соответствующие экстремальному зимнему выхолаживанию контрольного и будущего периодов, которые иллюстрируют вторгающиеся массы холодного воздуха с севера в акваторию Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Önal B., Semazzi F.H.M. Regionalization of Climate Change Simulations over the Eastern Mediterranean // J. Climate.– 2009.– 22.– P.1944-1961.

2. *Feldmann H., Schadler G., Panitz H.-J., Kottmeier C.* 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. *Анисимов А.Е.* Численное моделирование климатической изменчивости Черноморского региона / Дисс. ... канд. физ.-мат. наук.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2012.– 155 с.
4. *Rowell D.P.* A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability // *Clim. Dyn.*– 2005.– 25.– P.837-849.
5. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.4. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия* / Под ред. А.И.Симонова, Э.И.Альтмана.– С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1991.– 430 с.
6. *Esteban P., Martin-Vide J., Mases M.* Daily atmospheric circulation catalogue for western Europe using multivariate techniques // *Int. J. Climatol.*– 2006.– 26.– P.1501-1515.
7. *Дьяконов В., Круглов В.* Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник.– С.-Пб.: Питер, 2001.– 480 с.

Матеріал поступив в редакцію 12.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ Представлені результати чисельного експерименту по складанню регіональних проєкцій зміни клімату Причорноморського регіону у кінці ХХІ ст. з використанням регіональної кліматичної моделі HadRM3P. Описуються результати моделювання, наводяться ілюстрації просторового розподілу змін явних, прихованих потоків тепла для зимового сезону у кінці ХХІ ст. в порівнянні з контрольним періодом. Розглядаються типові синоптичні ситуації, що відповідають екстремальному зимовому вихолодженню північно-західної шельфової акваторії Чорного моря, а також їх зміни до кінця століття.

ABSTRACT The results of numeral experiment are presented on drafting of regional projections of change of climate in the end the XXI century for Black Sea region with the use of regional climatic model of HadRM3P. Modeling results are described; illustrations over of spatial distribution of changes of sensible and latent heat fluxes are brought for a winter season in the end the XXI century as compared to a control period. Typical synoptic situations corresponding to the extreme winter cooling of north-western shelfy aquatorium of the Black sea, and also their changes, are examined by the end of century.