

**С.В. ИВАНОВ**, к.г.н., **Ю.С. ТУЧКОВЕНКО**, к.ф.-м.н.  
Одесский государственный экологический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗО-МАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ И МОРЕ НАД СЕВЕРО-ЗАПАДНЫМ ПРИЧЕРНОМОРЬЕМ

*Рассматриваются результаты совместного использования численных моделей атмосферы и моря для описания мезо-масштабных процессов в геофизическом пограничном слое. Расчеты проведены для северо-западной части Черного моря. Показано, что учет неоднородностей в поле ветра в моделях высокого разрешения (1-3км) позволяет существенно уточнить характеристики циркуляции вод в прибрежных и приустьевых областях моря*

**Ключевые слова:** геофизический пограничный слой, мезо-масштабные процессы, численные модели атмосферы и моря, северо-западная часть Черного моря.

**Введение.** Точное знание особенностей сложной динамики атмосферы и моря, а также взаимодействия геофизических пограничных слоев, является необходимой составляющей для правильного понимания физических процессов, происходящих в этих средах, а, следовательно, и для последующего их адекватного описания. Потоки тепла, влаги и импульса через поверхность раздела двух сред являются основными показателями взаимодействия [1-3]. Эти потоки определяются состоянием пограничных слоев и подвержены временной изменчивости разных масштабов, от сезонного и синоптического до мезо- и мелкомасштабной турбулентности [4].

Процессы взаимодействия имеют сильно нелинейный характер, что требует особой осторожности в использовании процедур осреднения и сглаживания соответствующих полей. Применение таких процедур неизбежно при использовании дискретного описания полей в атмосфере и морской среде. Поэтому степень реалистичности описания взаимодействующих пограничных слоев во многом зависит от пространственного и временного разрешения численной модели. К этому можно добавить, что в прибрежной зоне моря существенное влияние на процессы в геофизическом пограничном слое оказывают морфологические особенности акватории.

С другой стороны, количественная оценка мезо-масштабных характеристик турбулентно-циркуляционного режима в пограничных слоях атмосферы и океана является на сегодняшний день одной из актуальных задач мониторинга окружающей среды. Она основывается на прогнозе различной заблаговременности погодных условий над регионом и их влияния на условия адвективного и диффузионного переноса в воздушной и морской средах различного рода примесей, включая загрязняющие вещества. Такая оценка может быть получена на основе использования модельного подхода для описания циркуляционных режимов во взаимодействующих пограничных слоях.

В данной работе представлены результаты численных экспериментов с атмосферной моделью MM5 [5, 6] и термогидродинамической моделью MECCA [7, 8], используемых для описания геофизических процессов в пограничном слое северо-западной части Черного моря. Цель работы – показать преимущества совместного использования численных атмосферных и гидродинамических моделей при имитационном моделировании и прогнозе пространственно-временной изменчивости гидрологической структуры и циркуляции вод в шельфовых областях моря на примере северо-западной части Черного моря (СЗЧМ).

**Методы и район исследования.** В качестве начальных и граничных условий для атмосферной модели используются поля анализа и прогноза NCEP (National Center for Environmental Prediction) на период 10-15 марта 2005. Эти данные имеют достаточно грубое разрешение (1 градус широтно-долготной сетки) и содержат сглаженные и линейризованные поля, что не допускает их применение для описания мезо-масштабных нелинейных процессов в атмосфере в целом, и в пограничном слое особенно. Применение метода вложенных сеток с двунаправленным обменом информацией, реализованного в модели MM5, допускает восстановление мезо-масштабных процессов на основе физических закономерностей, заложенных в самой модели, и в соответствии с макроциркуляционными характеристиками атмосферы, используемыми в качестве краевых условий. В данной работе используются четыре вложенные сетки с разрешением 3, 9, 27 и 81 км, соответственно. Материнская область включает Евро-Атлантический сектор от побережья Северной Америки до Урала, что позволяет проследить на периоде интегрирования модели эволюцию крупных синоптических систем, способных оказать воздействие на условия над Черным морем. На фоне этой крупномасштабной циркуляции моделируются мезо-масштабные особенности атмосферы, в первую очередь проявляющиеся над орографическими неоднородностями и на границе раздела суша - море. Эти особенности анализируются на сеточной области размером 200 x 200 узлов, с горизонтальным разрешением 3 км и 32 уровнями по вертикали. Расчетная область покрывает всю акваторию северо-западной части Черного моря и прилегающие береговые зоны. Полученные поля атмосферных величин в последующем используются в качестве граничных условий на поверхности моря в термогидродинамической модели формирования термохалинной структуры и динамики вод северо-западной части Черного моря.

Указанная акватория имеет ряд особенностей, определяющих значительную мезомасштабную пространственно-временную изменчивость ее гидрологических условий и циркуляции вод. Среди них можно выделить следующие. Относительная мелководность района, обуславливающая преобладание ветровой составляющей в формировании циркуляции вод. Наличие приустьевых областей четырех крупных рек – Дуная, Днепра, Южного Буга и Днестра, пресный сток которых оказывает существенное влияние на изменчивость термохалинной структуры вод и определяет плотностную составляющую течений. Сложная батиметрия района, характеризующаяся соседством относительно глубоких и мелководных областей – заливов, банок, а также свалом глубин в прибрежной зоне.

Для адекватного описания динамики вод в таком сложном по морфологическим и гидрологическим условиям регионе, используется трехмерная численная имитационная термогидродинамическая модель, реализованная в криволинейной по вертикали системе координат, включающая в себя блоки расчета потоков тепла и импульса через поверхность моря (на основе метеорологических данных), усвоения гидрометеорологической информации на боковых границах расчетной области и позволяющая воспроизводить пространственно-временную изменчивость уровня моря, термохалинной структуры вод, трехмерного поля течений и интенсивности турбулентного обмена на временных отрезках от нескольких суток до годового цикла в акваториях морского шельфа со сложными морфологическими и гидрологическими характеристиками. Подробное описание математической структуры модели и результатов ее адаптации к условиям СЗЧМ приведено в работах [9, 10].

В численных экспериментах с термогидродинамической моделью расчетная область СЗЧМ аппроксимируется пространственной сеткой 65 × 44 узла с шагом 5000 м. Используются 10 расчетных уровней по глубине в  $\sigma$ -системе координат.

**Результаты численных экспериментов**, полученные в данной работе, показывают возможности моделирующей системы при воспроизведении динамических и физических особенностей состояния моря и атмосферы над СЗЧМ и прилегающими областями суши. Использование расчетной сетки с высоким разрешением позволяет описывать поле ветра во многих деталях. На рис. 1 показана эволюция поля ветра через каждые 12 часов за расчетный период. Как видно из рисунка, только в начальный момент времени поле изотак имеет сглаженную структуру, которая получается на основе полей NCEP анализа с низким разрешением, используемых в качестве начальных условий. В ходе последующего интегрирования в поле ветра на нижних модельных уровнях формируются мезо- и мелко-масштабные структуры, обусловленные термическими и орографическими неоднородностями подстилающей поверхности. Над сушей эти локальные циркуляции в значительной мере связаны с местным рельефом и имеют пространственные масштабы порядка единиц – десятков км. При этом поля давления в соответствующие моменты времени сохраняются достаточно гладкими (не приводятся).

Поле ветра над водной поверхностью в открытой части моря сохраняет свою макроструктуру и в значительной степени согласовано с полем давления. Преимущество использования расчетной сетки с высоким разрешением становится очевидным для прибрежных областей. Влияние берега в формировании неоднородностей полей ветра над морем при данной синоптической ситуации прослеживается на расстоянии до 40-50 км от северо-западного низменного побережья до 100-150 км со стороны Крымского полуострова. Причем при данной синоптической ситуации такое влияние отмечается с наветренной стороны. Это свидетельствует о том, что поле ветра на мезо-масштабах, даже над такой сравнительно однородной подстилающей поверхностью как морская, представляет собой достаточно сложную картину. В результате воздействия такого поля на верхний пограничный слой моря будет формироваться дрейфовый поток, который на мезо-масштабах должен существенно отличаться от получаемого при пространственно квазиоднородном поле ветра. Как следствие, в приустьевых районах моря изменится пространственная структура термохалинных течений, обусловленных мезо-масштабными особенностями распространения трансформированных речных вод. Следовательно, оценки как бароклиных, так и баротропных скоростей течений в локальных точках пространства, будут различными при использовании полей ветра, полученных при численном моделировании на сетках с низким и высоким пространственным разрешением. Последние позволяют получить более точные оценки переноса гидрологических и экологических характеристик состояния морской среды за счет учета мезо-масштабной неоднородности в поле ветра и влияния этой неоднородности на динамику морских вод.

Помимо динамического фактора, важным для процессов взаимодействия пограничных слоев является и термический фактор. Важными характеристиками взаимодействия пограничных слоев являются потоки явного и скрытого тепла через поверхность. Они рассчитываются с учетом нелинейных зависимостей между несколькими атмосферными параметрами, и поэтому очень чувствительны к процедурам осреднения и сглаживания. Последние могут в значительной мере занижать значения потоков. В этом случае расчеты на модельной сетке высокого разрешения позволяют получить более точную и детальную картину пространственной структуры потоков (рис. 2). Для рассматриваемой синоптической ситуации отмечается формирование вдоль направления действия ветра языков повышенных значений потоков тепла в атмосферу с очагом в северной части рассматриваемой акватории, что

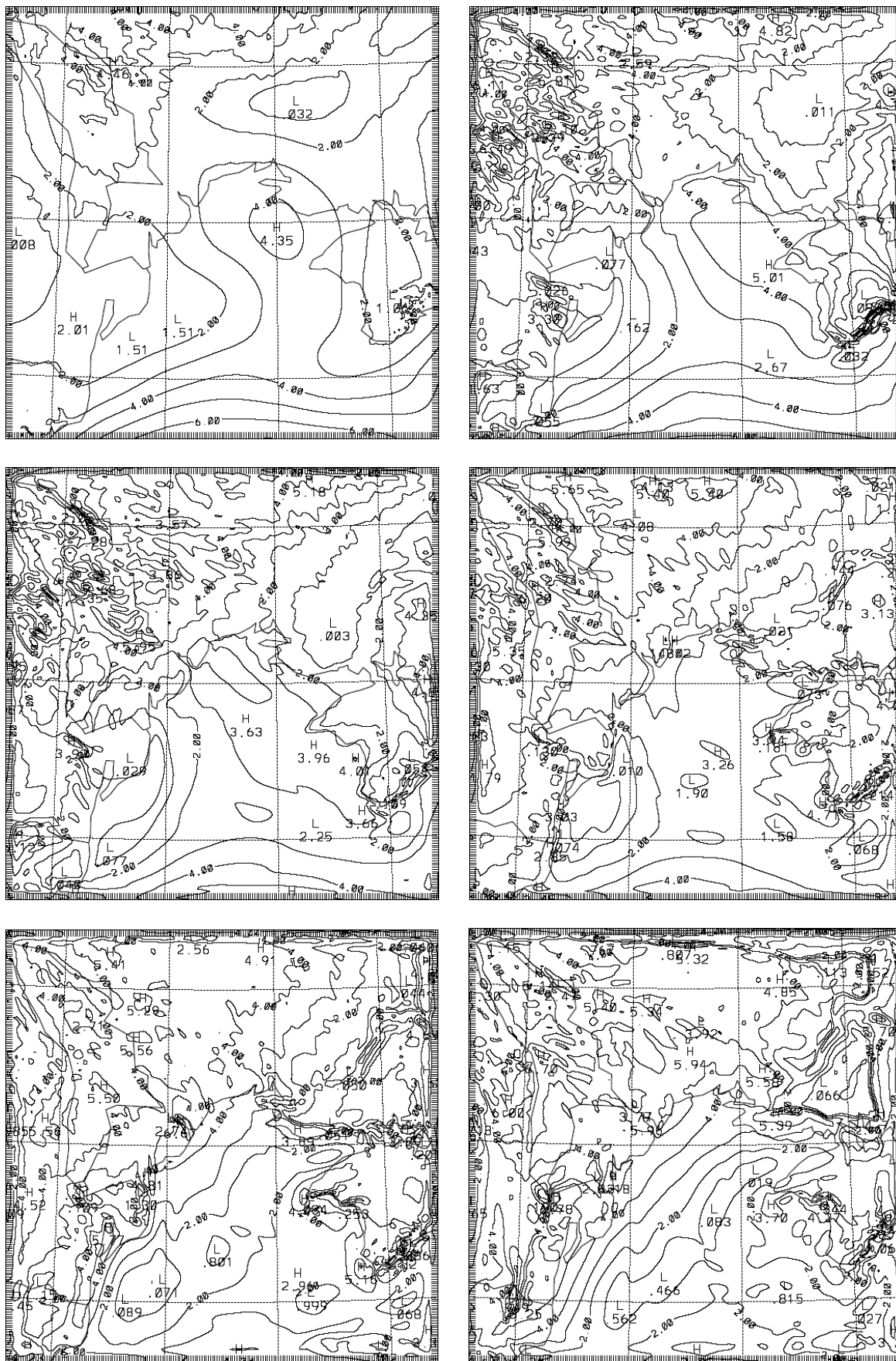


Рисунок 1 - Эволюция модельных полей ветра через каждые 12 часов над северо-западной частью Черного моря в период 10-12 марта 2005 г.

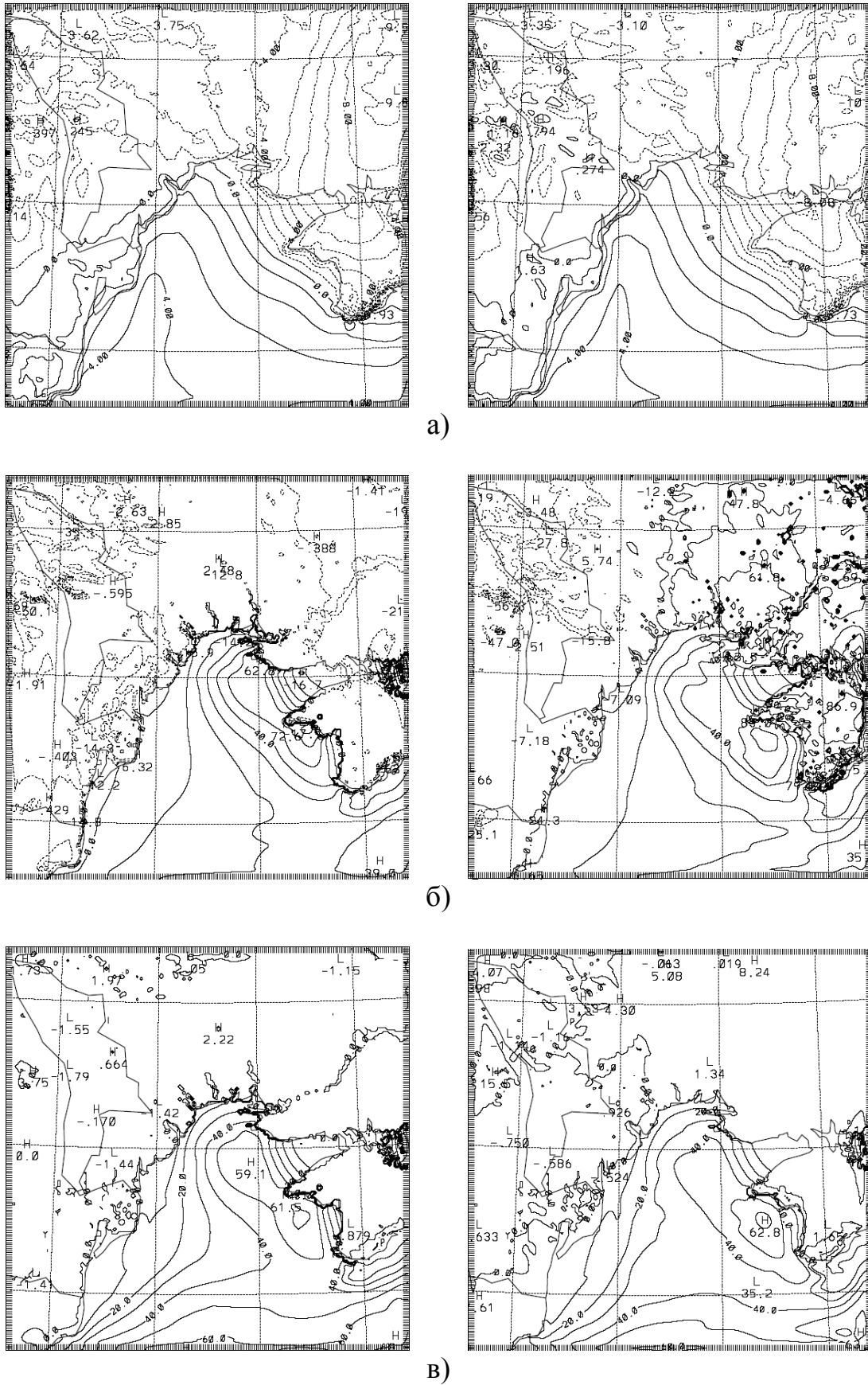


Рисунок 2 - Модельные поля температуры воздуха (а), потоков явного (б) и скрытого (в) тепла на 10 и 12 марта 2005 г., соответственно.

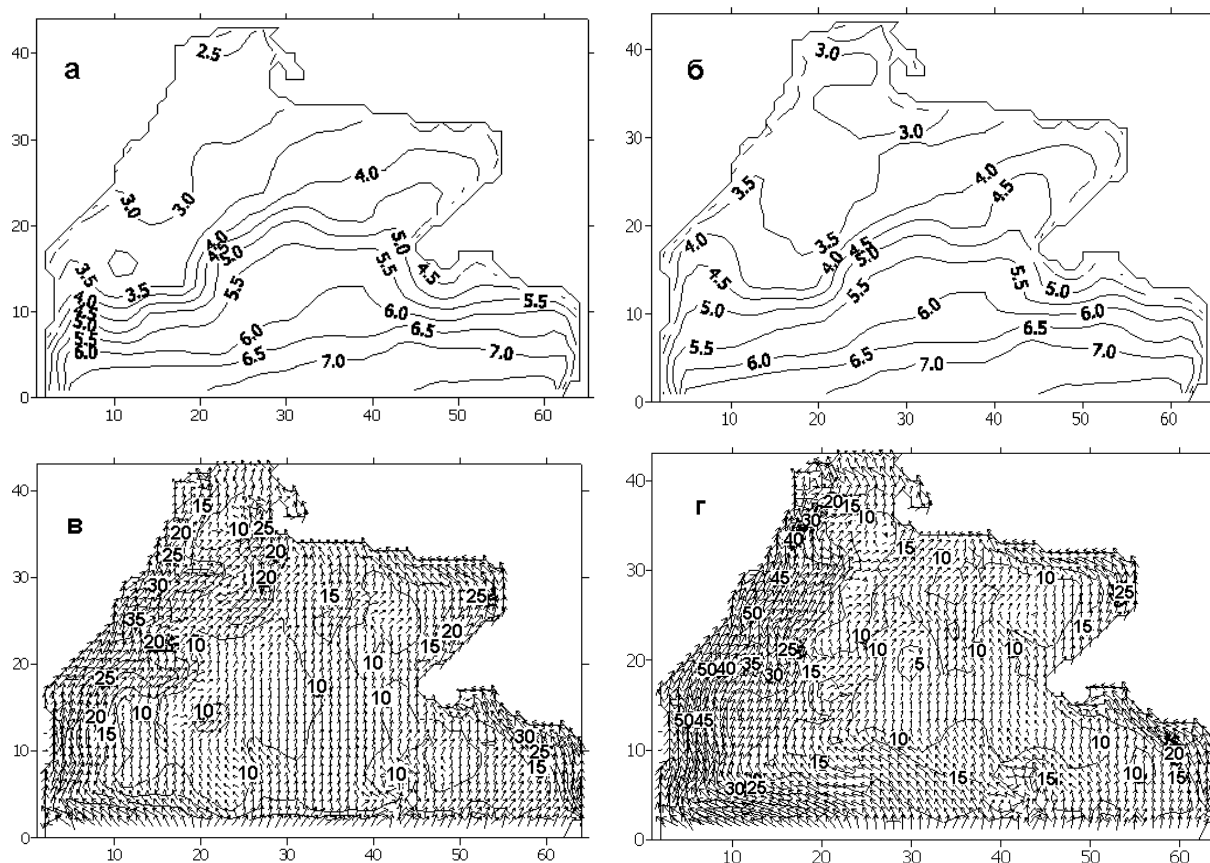


Рисунок 3 - Поля температуры воды в поверхностном слое (вверху), а также векторов и изотах скорости поверхностных течений (внизу), полученные в модели на конец расчетного периода при пространственно однородном (а, в) и неоднородном (б, г) поле ветра.

может объясняться поступлением прогретых вод из Днепровско-Бугского лимана и повышением контраста температур вода-воздух. Другая область высоких значений потоков скрытого тепла находится в районе Каламитского залива у побережья Крыма. Там же отмечается и значительная мезо-масштабная изменчивость в поле ветра.

Преимущества использования совместной модели геофизического пограничного слоя атмосфера-море при решении задач гидрометеорологии и экологии моря демонстрирует следующий численный эксперимент. С помощью термогидродинамической модели рассчитывались поля суммарных (ветровых, плотностных и стоковых) течений и эволюция термохалинной структуры вод в период с 10 по 15 марта. В одном случае гидрофизические поля рассчитывались с учетом неоднородностей в поле ветра, полученных с помощью атмосферной модели. В другом случае использовались осредненные по пространству модельные поля ветра.

Результаты расчетов гидрофизических полей для случаев с пространственно однородным и неоднородным полем скоростей ветра приведены на рис. 3. Различия в полях скорости поверхностных течений прослеживаются достаточно отчетливо. При использовании неоднородного поля ветра интенсивность циркуляции вод выше в западной части расчетной области и ниже в восточной, чем в расчетах с однородным полем ветра. Также отмечаются различия в интенсивности циркуляции вод в районе Тендровской косы, где наблюдается усиление течений при однородном поле ветра за счет возрастания горизонтальных градиентов плотности морской воды в следствии

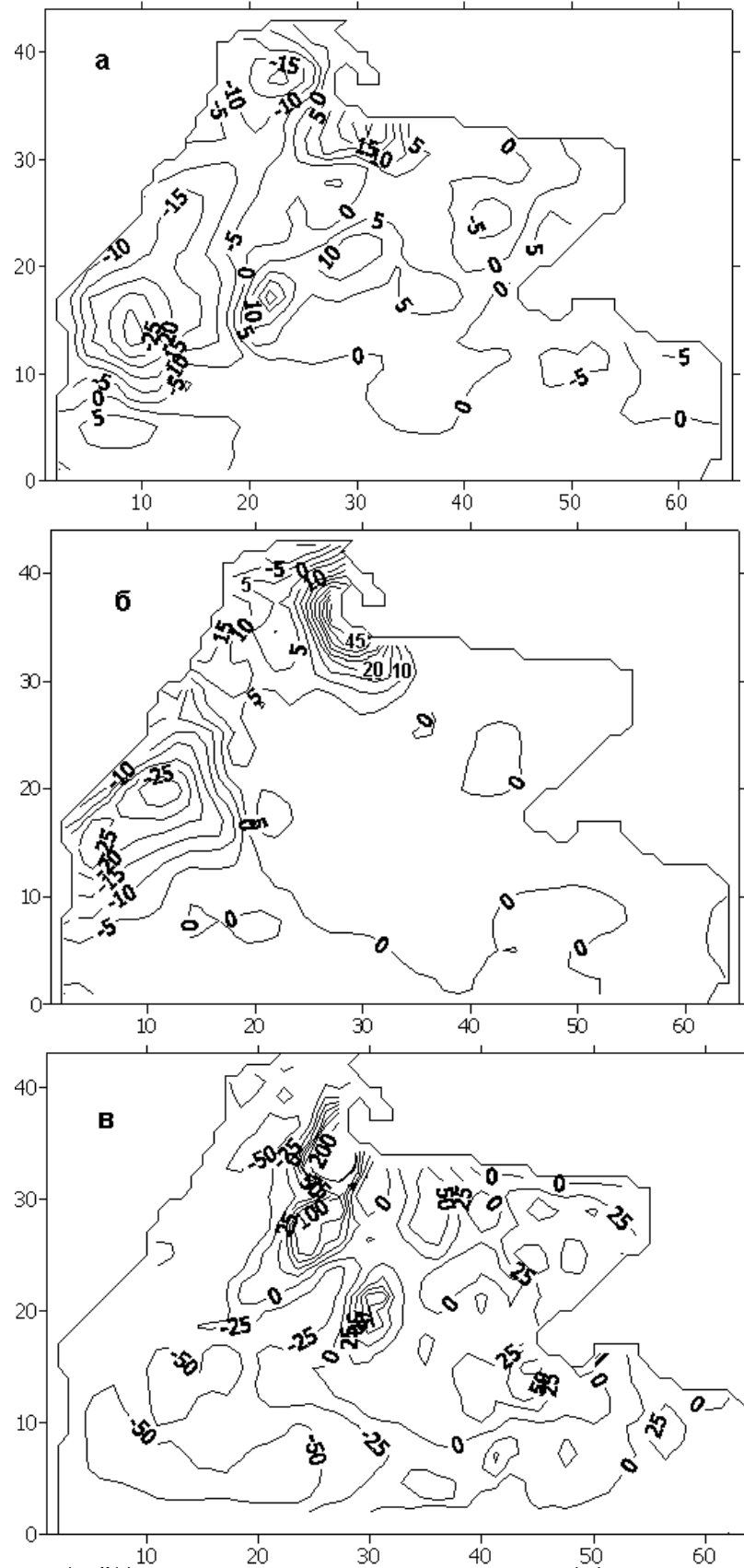


Рисунок 4 - Различия (в %) между значениями температуры (а), солёности воды (б), модуля скорости течений (в) в поверхностном слое, полученными при расчетах с пространственно однородным и неоднородным полем ветра.

особенностей распространения языка распресненных вод из Днепровско-Бугского лимана. При неоднородном поле ветра значительной интенсификации течений в этой области не наблюдается.

Такой же характер различий наблюдается и для температуры поверхности моря. При однородном поле ветра расчетные значения температуры морской поверхности в северной части расчетной области оказываются выше, чем в случае использования неоднородных полей ветра, рассчитанных по атмосферной модели, что также связано с изменением интенсивности и характера адвективного распространения относительно холодных речных вод из Днепровского-Бугского лимана.

Для сравнительного анализа результатов двух численных экспериментов были рассчитаны процентные отклонения модельных значений на конец расчетного интервала времени – 5 суток (рис.4). При этом использовалось выражение вида

$$\alpha_{i,j} = \left( \frac{f_{i,j}}{g_{i,j}} - 1 \right) \cdot 100\%,$$

где  $\alpha_{ij}$  – отклонение в процентах между рассчитанными значениями моделируемых гидрофизических величин в точке (i, j) расчетной области;  $f_{i,j}$ ;  $g_{i,j}$  - значения моделируемой величины полученные при однородном и неоднородном ветре, соответственно.

Как следует из сравнения, учет влияния неоднородностей поля ветра в приводном слое атмосферы мало сказывается в открытой части моря, но приводит к существенным изменениям в приустьевых областях. Так, скорость течения в этих районах удается уточнить примерно на 50%, значения температуры воды до 25% и солености на 25-45%. При этом уточнение значений гидрофизических параметров не имеет однонаправленного воздействия, только в сторону их повышения или понижения, а связано с локальными особенностями. В частности, при учете неоднородности поля ветра, скорость течения у западного побережья повышается на 50%, тогда как в восточной части расчетной области она снижается на 25%, а у Тендровской косы в 2 раза (на 200 %). В результате, температура воды у западного побережья повышается на 10-25 %, уменьшается распреснение вод в Дунай-Днестровском междуречье и, наоборот, увеличивается вынос распресненных вод из Днепровско-Бугского лимана на юг – в направлении Тендровской косы и юго-запад – вдоль южного склона Одесской банки. Такие изменения в полях моделируемых характеристик при переходе от сглаженного (однородного) поля ветра к полю ветра с наличием мезо-масштабных неоднородностей свидетельствует о важности учета последних при решении прикладных задач гидрометеорологии и экологии моря.

**Заключение.** Представленная работа демонстрирует преимущества совместного использования моделей атмосферы и морской термогидродинамики для расчета физических и динамических характеристик двух сред и особенностей их взаимодействия. Показано, что учет мезо-масштабных неоднородностей в поле ветра уточняет расчет динамики вод, а следовательно и пространственно-временной изменчивости их свойств, в приустьевых и прибрежных областях моря, но мало сказывается в открытой части моря.

### Список литературы

1. *Wadley M., Bigg G., Stevens D.P., Johnson A.J.* Sensitivity of the North Atlantic to surface forcing in an ocean general circulation model // *J.Phys.Oceanogr.* 1996. – v.26. – pp.1129-1141.



2. Frankignoul C., Kestenare E. The surface heat flux feed back. Part II. Direct and indirect estimates in the ECHAM4 / OPA 8 coupled GCM // *Clim.Dyn.* 2002. – v.19. – pp.225-246.
3. Frankignoul C. An intercomparison between the surface heat flux feed back in five coupled models COADS and the NCEP reanalysis // *Clim.Dyn.* 2004. – v.22. – pp.373-388.
4. Zolina O., Gulev S. Variability of the ocean-atmosphere associated with atmospheric cyclones // *World Clim. Res. Prog.* 2001. – 115. – pp.189-192.
5. Grell, G. A., Dudhia J., Stauffer D.R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) // *NCAR Technical Note*, 1994. – 398. - 117 pp.
6. Haagenson P. L., Dudhia J., Grell G.A., Stauffer D.R. The Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) source code documentation // *NCAR Technical Note*, 1994. – 392. - 200pp.
7. Hess K.W. MECCA Programs documentation: Technical Report // NOAA.– NESDIS 46.– Washington, D.C., 1989.– 97 p.
8. Тучковенко Ю.С. Гидродинамічна модель для розрахунку трьохмерної циркуляції і термохалінної структури вод северо-западної частини Чорного моря // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія.*– 2002.– № 45. – С. 129 - 139.
9. Тучковенко Ю.С. Математична модель формування термохалінної структури і циркуляції вод в лиманах, приустьєвих і шельфових областях северо-западної частини Чорного моря // *Екологічна безпека прибережної і шельфової зон і комплексне використання ресурсів шельфа.*– Севастополь: НАН України, МГІ.– 2003.– С. 138-153.
10. Тучковенко Ю.С. Числова термогідродинамічна модель як складова частина геоінформаційної системи // *Геоінформатика.*– Київ.–2004.– № 1. – С. 96 – 106.

**Моделювання мезо-масштабних процесів в північно-західному Причорномор'ї.  
Іванов С.В., Тучковенко Ю.С.**

*Розглядаються результати спільного використання числових моделей атмосфери і моря для опису мезо-масштабних процесів у геофізичному граничному шарі. Розрахунки проведені для північно-західної частини Чорного моря. Показано, що врахування неоднорідностей у полі вітру в моделях високого розділення (1-3км) дозволяє істотно уточнити характеристики циркуляції вод у прибережних та пригирлових областях моря.*

**Ключові слова:** геофізичний граничний шар, мезо-масштабні процеси, числові моделі атмосфери і моря, північно-західна частина Чорного моря.

**Modelling of meso-scale processes in the atmosphere and sea over the northern-western Black Sea area. Ivanov S.V., Tuchkovenko Y.S.**

*The coupled atmosphere – sea model is considered in order to describe meso-scale processes within the geophysical boundary layers. The computations are performed over the north-west Black sea area. The results show that proper accounting of heterogeneous structures at the low level wind fields on the basis of the high resolution atmospheric model allows us to detail the drift circulation at the coastal and river issue zones.*

**Keywords:** geophysical boundary layer, meso-scale processes, coupled atmosphere – sea model, north-western part of Black Sea.