

## Численное моделирование влияния температурных контрастов суша – море на атмосферную циркуляцию в Черноморском регионе

Формирование полей приводного ветра над Черным морем происходит под влиянием многих физических факторов. Одним из важнейших является муссонный механизм, связанный с сезонными изменениями контрастов плавучести над морем и окружающей сушей. Для выделения эффектов, обусловленных этим механизмом, проведены и описаны численные эксперименты по чувствительности региональной модели атмосферной циркуляции к изменению температурных контрастов суша – море. Показано, что влияние этих эффектов ограничивается нижней частью атмосферы. Приведенные оценки климатических полей возмущений позволяют описать муссонный механизм, определяющий сезонную изменчивость поля завихренности скорости ветра и, как следствие, сезонную изменчивость крупномасштабной циркуляции вод в Черном море.

**Ключевые слова:** Черное море, муссонный эффект, климат, моделирование климата.

**Введение.** В замкнутых или почти замкнутых бассейнах Северного полушария, таких как Черное и Каспийское моря, крупномасштабная циркуляция носит циклонический характер. Характерным примером ее является Основное Черноморское течение, которое в краевых областях моря имеет циклоническую направленность. Считается, что его сезонная изменчивость связана с сезонной изменчивостью тепловых контрастов суша – море [1, 2], а в усредненной за год циркуляции существенную роль играет циклоническое поле ветра над морем, являющееся в основном следствием характерной прибрежной орографии – Кавказские и Понтийские горы на юго-востоке служат преградой для приводного ветра [3]. Сезонная изменчивость приводного ветра наиболее явно выражена в западной части моря, что связано с сезонными изменениями контрастов плавучести над морем и окружающей сушей, действие которых можно определить как муссонный механизм. В восточной части моря, кроме того, на поле приводного ветра оказывает влияние и интенсивный орографический эффект, имеющий меньшую сезонную изменчивость. В целом над морем завихренность скорости ветра в течение года остается циклонической, а ее среднегодовая величина сравнима с диапазоном ее сезонной изменчивости.

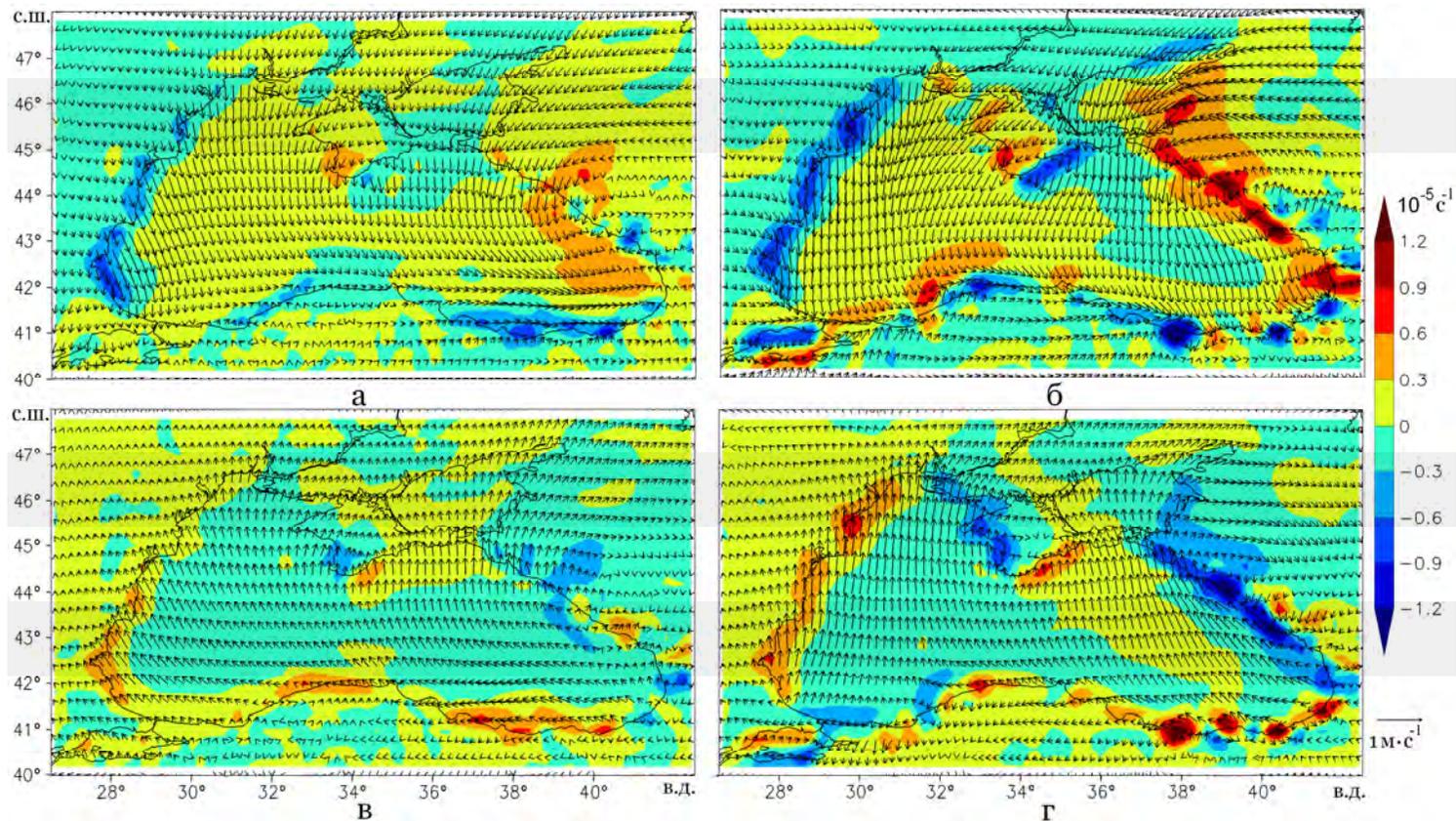
**Описание численных экспериментов.** Поля приповерхностного ветра и их сезонная изменчивость формируются под влиянием многих физических факторов, из которых для Черноморского региона одним из важнейших явля-

ется муссонный механизм. Вообще говоря, эффект генерации циклонической завихренности потоками плавучести над морем известен. Например, в работе [4] рассмотрена задача о циркуляции в атмосфере, вызванной нагреванием в результате высвобождения явного тепла в нижней части тропосферы от  $\delta$ -источника на поверхности. В численных моделях атмосферной циркуляции воспроизводятся или параметризуются все основные процессы, определяющие состояние атмосферы.

Поэтому была поставлена задача о выделении в «чистом» виде эффектов, связанных с муссонным механизмом, в рамках численного моделирования региональной атмосферной циркуляции. Численные эксперименты по чувствительности атмосферной циркуляции в Черноморском регионе к изменению температурных контрастов суша – море проводились в рамках проекта *PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies)* [5]. Использовались модель атмосферной циркуляции *HadRM3P* и известная методика вложенных сеток. В качестве входных взяты данные реанализа *ERA-40* с разрешением  $\sim 125 \times 125$  км [6], а расчет региональных полей проводился с разрешением  $25 \times 25$  км. Описание численной модели дано, например, в работе [7].

Предварительно были выполнены модельные расчеты атмосферной циркуляции для контрольного периода 1958 – 2001 гг. [3]. В ходе экспериментов по чувствительности было проведено две серии расчетов для 1997 – 2000 гг., в которых задавались отклонения температуры поверхности моря (ТПМ) от исходных значений на  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Результаты расчетов для «теплого» и «холодного» моря сравнивались с результатами контрольного расчета за аналогичный период, так что разности между ними представляют собой отклик атмосферы на вносимые возмущения ТПМ. Конечно, отклонения температуры на  $\pm 2^\circ\text{C}$  нельзя считать малыми. Они сравнимы по величине с климатическими контрастами температуры между морем и сушей. В то же время они меньше величин температурных контрастов в текущие синоптические сроки, а для выделения более слабых откликов в случае задания меньших отклонений ТПМ требуется проведение расчетов на длительные сроки. При отклонениях ТПМ на  $\pm 2^\circ\text{C}$  отклик атмосферы хорошо выделялся в расчетах на 4-летний период.

**Обсуждение результатов численных экспериментов.** Пространственная структура атмосферной циркуляции в Черноморском регионе, ее сезонная изменчивость и мезомасштабные особенности, полученные в результате численного моделирования по данным за 1958 – 2001 гг., рассмотрены в работе [3]. В статье приведены климатические, т.е. осредненные за длительный промежуток времени, поля скорости ветра и завихренности скорости. Описаны также крупномасштабные зимняя циклоническая и летняя антициклоническая циркуляции во всем Черноморском регионе, включая Азовское море и Крым. Показано, что очертания моря и высокие Понтийские и Кавказские горы определяют пространственную конфигурацию сформировавшихся крупномасштабных циклона и антициклона над Черным морем.



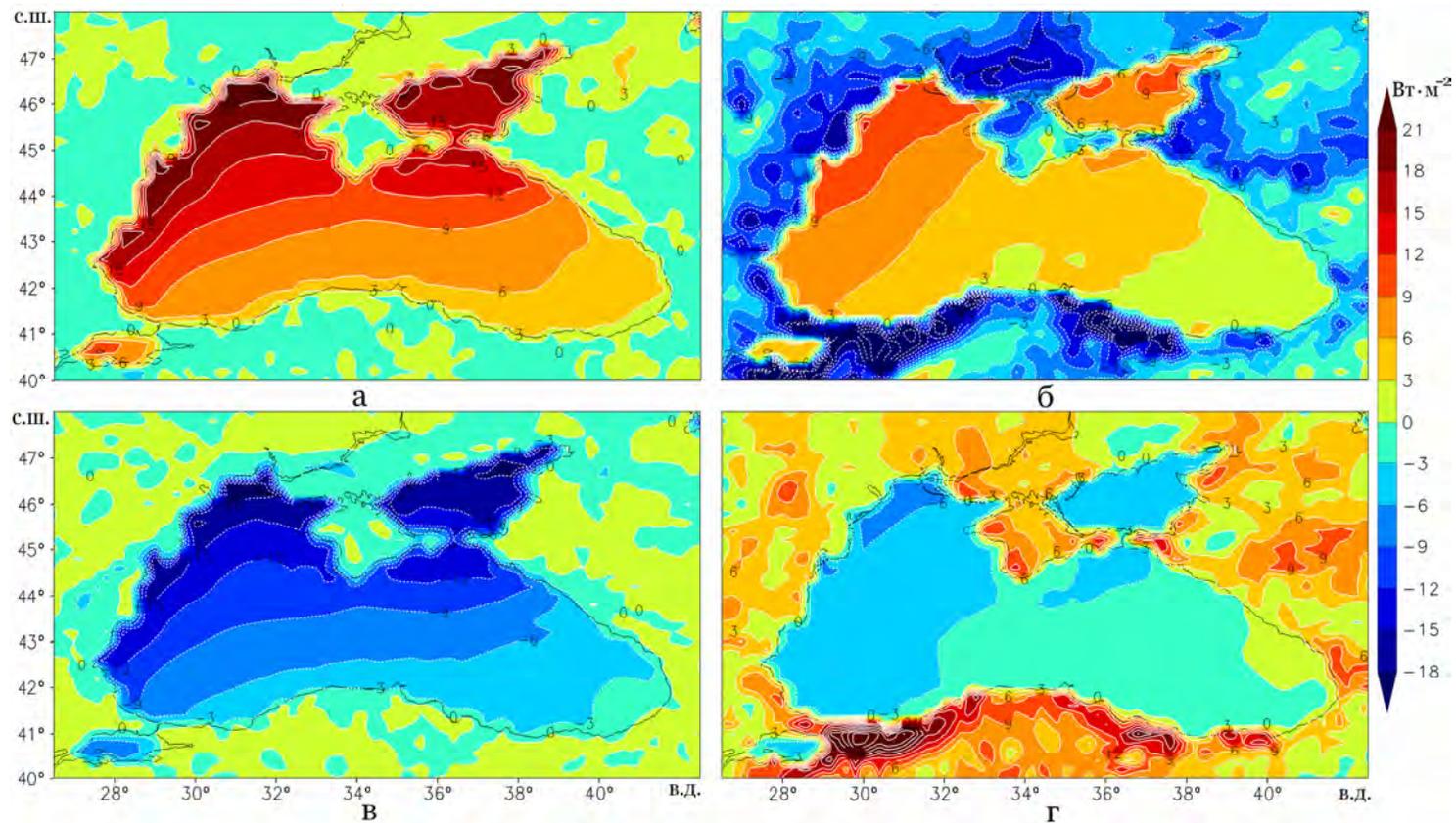
**Р и с. 1.** Разности векторов скорости приповерхностного ветра ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) и завихренности скорости ( $10^{-5}\text{с}^{-1}$ ) на высоте 10 м между результатами двух экспериментальных расчетов с отклонениями ТПМ на  $\pm 2^\circ\text{C}$  по данным за 1997 – 2000 гг. и контрольного расчета за аналогичный период для случаев теплого и холодного моря: а – январь,  $+2^\circ\text{C}$ ; б – июль,  $+2^\circ\text{C}$ ; в – январь,  $-2^\circ\text{C}$ ; г – июль,  $-2^\circ\text{C}$

На рис. 1 приведены возмущения скорости и завихренности скорости приповерхностного ветра для теплого и холодного моря для января и июля. Для случая теплого моря как для зимнего, так и для летнего месяцев отклонения ТПМ вызывают формирование дополнительной циклонической завихренности в атмосфере над морем; для холодного моря – эффект противоположный. Сами величины полей возмущений меньше, чем исходных полей, поскольку, как уже было сказано, текущие контрасты температуры между сушей и морем превышают  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Так как орографические эффекты являются общими для контрольного расчета и расчетов с отклонениями ТПМ, то на рис. 1 выделяются возмущения, вносимые температурными контрастами суша – море. Конечно, орографические эффекты также частично связаны с температурными контрастами, поэтому разностные поля содержат возмущения, вносимые совместным влиянием гор и температурных контрастов.

Поля возмущений скорости ветра показывают характерную особенность Черного моря – для случаев и теплого и холодного моря высокие горы на юге и востоке региона являются барьером для проникновения морского воздуха на сушу. В результате для теплого моря положительный поток плавучести, создаваемый в пограничном слое над Черным морем и вызывающий подъем воздуха и конвергенцию в нижней части пограничного слоя, обеспечивается притоком воздуха только с северной и северо-западной границ моря. Точно так же для холодного моря отток воздуха в пограничном слое происходит через северную границу моря, где нет препятствия в виде высоких гор.

Совместное влияние орографических и термических факторов показано на рис. 1 в виде небольших зон возмущений завихренности скорости ветра в краевых областях моря. В случае теплого моря – это зоны антициклонической циркуляции в районе перехода суша – море у южного берега Черного моря и южного берега Крыма, а также зоны циклонической циркуляции около Кавказского побережья. Для холодного моря возмущения завихренности в краевых областях моря, в общем, имеют противоположный характер – циклонические зоны сменяются антициклоническими и наоборот. Для западной части моря, где орография выражена слабо, характерно влияние только термических факторов (рис. 1). Появление здесь полос интенсивной прибрежной завихренности скорости ветра связано с перестройкой планетарного пограничного слоя при переходе воздушного потока с суши на море для теплого моря либо с моря на сушу – для холодного. Можно показать, что возмущения скорости ветра и завихренности скорости удовлетворяют в первом приближении геострофическим соотношениям.

На рис. 2 приведены карты возмущений величин потоков явного тепла. Как в случае теплого моря, так и в случае холодного максимальные по абсолютной величине возмущения возникают в январе. Если в юго-восточной части моря изменения минимальны, то в северо-западной части Черного моря и для Азовского моря поток явного тепла вырастает на  $18 - 20 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$  при положительной аномалии температуры и уменьшается на  $15 - 18 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$  при отрицательной. Не приводя данных, отметим, что причиной является то, что максимум модуля скорости ветра приходится на зимний сезон в той же северо-западной части акватории Черного моря (величины до  $7 - 8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ).



**Р и с. 2.** Разности величин потоков явного тепла ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ) между результатами двух экспериментальных расчетов с отклонениями ТПМ на  $\pm 2^\circ\text{C}$  по данным за 1997 – 2000 гг. и контрольного расчета за аналогичный период для случаев теплого и холодного моря: *а* – январь,  $+2^\circ\text{C}$ ; *б* – июль,  $+2^\circ\text{C}$ ; *в* – январь,  $-2^\circ\text{C}$ ; *г* – июль,  $-2^\circ\text{C}$

Летом скорость ветра ниже, соответственно уменьшаются и возмущения потоков тепла над морем – в частности, в западной области для теплого моря до  $9 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ , для холодного моря – до  $6 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ . Однако летом изменяются величины потоков тепла для прилегающей к морю суши. Вследствие дополнительного потока скрытого тепла в эксперименте с положительной аномалией температуры появляется дополнительная облачность, что приводит к уменьшению потока коротковолновой солнечной радиации и, как следствие, уменьшению потока явного тепла от суши. Для случая холодного моря отмечается противоположный эффект, хотя гораздо менее выраженный.

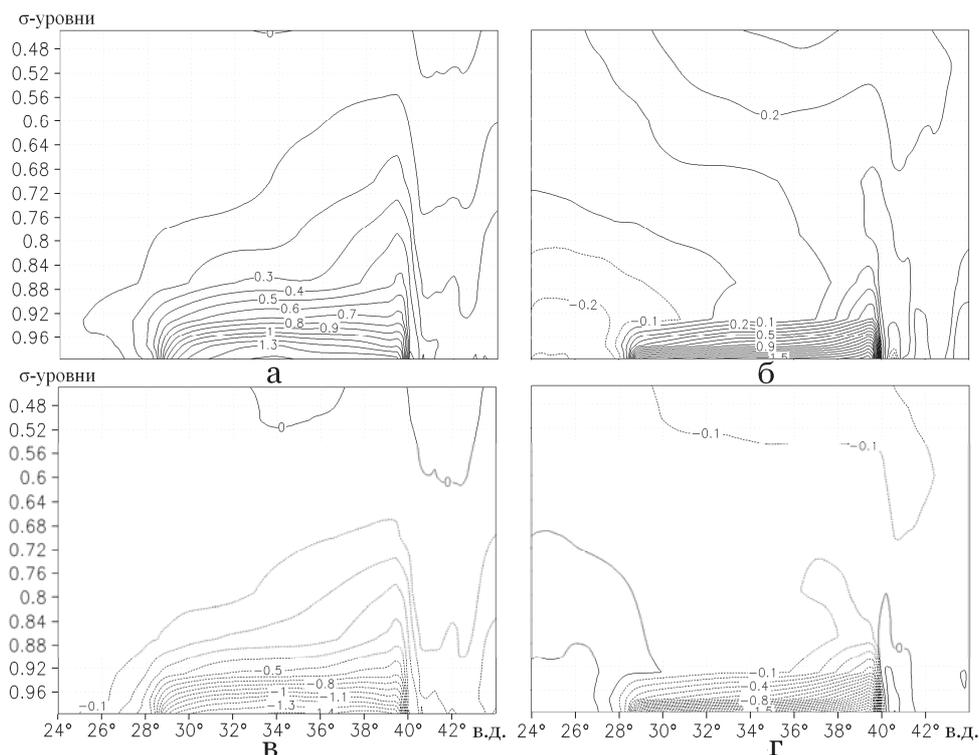
Появление локальных возмущений завихренности в море вблизи восточного побережья вызывается высокими Кавказскими горами. Они представляют собой преграду для проникновения воздуха в пограничном слое атмосферы с моря на сушу для теплого моря и, наоборот, с суши на море – для холодного. Лишь на северо-востоке горы понижаются настолько, что они не препятствуют проникновению холодного воздуха с суши на море (для теплого моря) или теплого воздуха с моря на сушу (для холодного моря). В этой области Кавказского побережья над морем образуются соответственно зоны циклонической или антициклонической завихренности.

Качественно пространственные распределения возмущений полей скорости ветра и завихренности скорости для теплого и холодного моря, с учетом разных знаков отклонений температуры, достаточно близки друг к другу. Различие связано с тем, что заданные отклонения ТПМ на  $\pm 2^\circ\text{C}$  не являются малыми, а все параметризации для потоков тепла в пограничном слое в численной модели, вообще говоря, нелинейны. Эти нелинейности и проявляются в нашем случае.

Циклонические возмущения завихренности над морем для случая положительной аномалии температуры сохраняются, как видно из рис. 1, для всего года, так же как и антициклонические — для отрицательной аномалии. Количественные различия в величинах отклика атмосферы в течение года объясняются сезонным ходом контрастов потоков явного тепла между сушей и морем, являющихся причиной изменения контрастов плавучести. Не приводя данных, укажем, что минимальные потоки тепла над морем и атмосферой характерны для весеннего периода, когда скорости приповерхностного ветра, так же как и контрасты температуры между морем и атмосферой в пограничном слое, невелики. Поэтому изменения атмосферной циркуляции, вызываемые отклонениями ТПМ, также минимальны для весеннего периода: величины возмущений завихренности осенне-зимнего периода превышают величины весеннего приблизительно в 2 раза.

Муссонный эффект локализован над морем в нижней части атмосферы [2]. На рис. 3 показаны возмущения потенциальной температуры  $\theta$  в зависимости от высоты на разрезе по  $43,5^\circ$  с. ш. для теплого и холодного моря. Как и следовало ожидать, дополнительный поток плавучести над морем формируется в планетарном пограничном слое. Для зимы возмущения  $\theta$  распро-

страняются до уровня 700 – 800 мбар (до высоты 2 – 3 км), летом область распространения возмущений  $\Theta$  понижается до 950 – 930 мбар (500 – 700 м). Характерной особенностью расположения изолиний потенциальной температуры на рис. 3 является их подъем на краях разрезов. Этот подъем связан с обтеканием воздухом Кавказских гор и проявляется для возмущений потенциальной температуры для случаев и теплого и холодного моря. Для холодного моря подъем отрицательных изотерм связан с подъемом холодного воздуха при натекании его на горы. Для теплого моря причина другая: как видно из рис. 1, подъем положительных изотерм в краевой области моря связан с притоком холодного воздуха с суши и вытеснением им теплого воздуха в пограничном слое вверх.

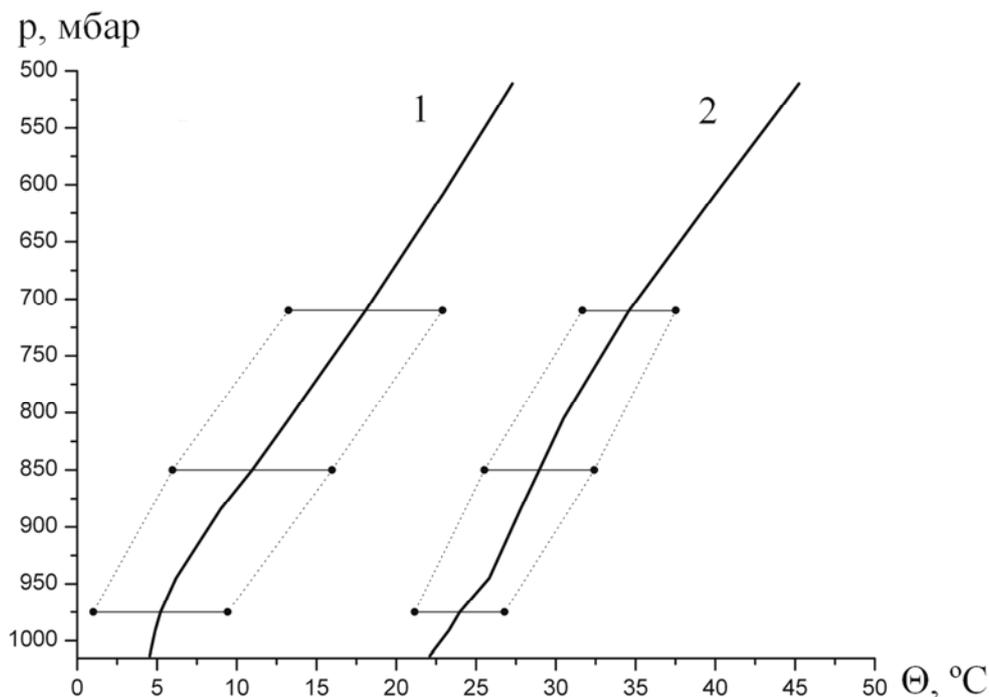


**Р и с. 3.** Разности величин потенциальной температуры атмосферы  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) на разрезе по  $43,5^{\circ}$  с.ш. между результатами двух экспериментальных расчетов с отклонениями ТПМ на  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  по данным за 1997 – 2000 гг. и контрольного расчета за аналогичный период для случаев теплого и холодного моря: *а* – январь,  $+2^{\circ}\text{C}$ ; *б* – июль,  $+2^{\circ}\text{C}$ ; *в* – январь,  $-2^{\circ}\text{C}$ ; *г* – июль,  $-2^{\circ}\text{C}$

Причиной значительного различия в высотах, на которые распространяется влияние отклонений ТПМ для зимы и лета, является сезонный ход стратификации планетарного пограничного слоя над морем. Для зимнего периода стратификация погранслоя ближе к нейтральной, для лета – к устойчивой. На рис. 4 показаны профили потенциальной температуры  $\Theta$  над морем для янва-

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2011, № 4 9

ря и июля, осредненные для контрольного периода 1958 – 2001 гг. Как видно, для зимы средние профили  $\Theta$  в планетарном пограничном слое ближе к нейтральным, а для лета (особенно в нижнем 500-метровом слое) – устойчивы.



**Р и с. 4.** Профили потенциальной температуры атмосферы  $\Theta$  (°C) на разных уровнях давления над районом открытого моря для января (1) и июля (2), осредненные для контрольного периода 1958 – 2001 гг. (отрезками показаны средние квадратичные отклонения на уровнях 975, 850 и 700 мбар)

Как известно, при устойчивой стратификации возмущения  $\Theta$  подавляются силами плавучести и сам погранслои становится мелким. Вообще говоря, это строго применимо лишь для отклонений ТПМ, малых по сравнению с диапазоном изменения потенциальной температуры в атмосферном пограничном слое. В нашем случае заданные отклонения ТПМ на  $\pm 2^\circ\text{C}$  почти сравнимы с перепадом температуры в пограничном слое, показанным на рис. 4. На этом рисунке также даны средние квадратичные величины отклонений температуры  $\sigma_\Theta$  от среднемесячных значений на трех уровнях в пограничном слое. При этом для каждого месяца выбирались суточные значения температуры, вычислялись отклонения от текущих среднемесячных величин и далее находились средние квадратичные значения за 44 года контрольного периода. С учетом малой изменчивости ТПМ в январе и июле по сравнению с изменчивостью температуры воздуха приведенные значения  $\sigma_\Theta$  характеризуют изменчивость стратификации пограничного слоя атмосферы. Хотя отклонения ТПМ на  $\pm 2^\circ\text{C}$ , заданные в численных экспериментах, сравнимы с пере-

падом температуры в пограничном слое атмосферы, они в 1,5 – 2 раза меньше среднеквадратичной величины контраста температуры между морем и атмосферой. Поэтому заданные отклонения ТПМ не изменили качественно результат осреднения по данным множества текущих синоптических ситуаций из реанализа, показанных на рис. 4. Тем не менее различия в реакции атмосферы на отклонения ТПМ разных знаков все же видны. Так, например, для января положительные возмущения  $\theta$  распространяются на несколько большие высоты, чем отрицательные. Как указывалось, можно было задать в экспериментах по чувствительности атмосферной циркуляции к изменению температурных контрастов суша – море меньшие отклонения ТПМ. Для этого, однако, требовалось бы проведение расчетов на более длительные сроки, что в то же время качественно не изменило бы полученные результаты.

**Заключение.** Влияние температурных контрастов суша – море ограничивается нижней частью атмосферы: для летнего периода — до высот 0,5 – 1 км, для зимнего — до 2 – 3 км. Выше влияние региональных особенностей подстилающей поверхности подавляется орографическими эффектами, а начиная с высот 5 – 7 км все определяется сезонной миграцией высотного струйного субтропического течения [2]. Выполненные численные эксперименты характеризуют особенности климатической атмосферной циркуляции, т. е. осредненной по данным множества различных синоптических ситуаций из реанализа, каждая из которых, как правило, существенно отличается от осредненного варианта. Вместе с тем полученные оценки климатических полей возмущений, вызванных температурными контрастами суша – море, позволяют достаточно наглядно описать муссонный механизм, определяющий сезонную изменчивость поля завихренности скорости ветра в Черноморском регионе и, в конечном счете, сезонную изменчивость крупномасштабной циркуляции вод в Черном море.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кортаев Г.К.* О причине сезонного хода циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 6. – С. 14 – 20.
2. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Барабанов В.С.* Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2002. – 38, № 2. – С. 247 – 258.
3. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е., Барабанов В.С.* Климатическая структура поля ветра в Черноморском регионе // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 3. – С. 3 – 13.
4. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. Т. 2. – М.: Мир, 1986. – 812 с.
5. *Jones R.G., Noguer M., Hassel D.C. et al.* Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. – UK, Exeter: Met Office Hadley Centre, 2004. – 40 p.

6. *Uppala S.M., Källberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 re-analysis // *Q.J.R.Meteorol.Soc.* – 2005. – 131. – P. 2961 – 3012.
7. *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.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: efimov@alpha.mhi.iuf.net

Матеріал поступив  
в редакцію 18.03.10  
Після доработки 20.04.10

**АНОТАЦІЯ** Формування полів приводного вітру над Чорним морем відбувається під впливом багатьох фізичних факторів. Одним із найважливіших є мусонний механізм, пов'язаний із сезонними змінами контрастів плавучості над морем і навколишньою сушею. Для виділення ефектів, обумовлених цим механізмом, проведені та описані чисельні експерименти з чутливості регіональної моделі атмосферної циркуляції до зміни температурних контрастів суша – море. Показано, що вплив цих ефектів обмежується нижньою частиною атмосфери. Надані оцінки кліматичних полів збурень дозволяють описати мусонний механізм, який обумовлює сезонну мінливість поля завихреності швидкості вітру та, як наслідок, сезонну мінливість крупномасштабної циркуляції вод у Чорному морі.

**Ключові слова:** Чорне море, мусонний ефект, клімат, моделювання клімату.

**ABSTRACT** Formation of surface wind above the Black Sea depends on many physical factors. One of the most important is the monsoon mechanism associated with seasonal variations of buoyancy contrasts above the sea and the surrounding land. To reveal the effects conditioned by this mechanism, numerical experiments on sensitivity of the regional model of atmospheric circulation to variability of the land-sea temperature contrasts are carried out and described. It is shown that these effects influence only the lower part of the atmosphere. The cited estimates of climatic disturbances' fields permit to describe the monsoon mechanism conditioning seasonal variability of the wind speed vorticity field and, consequently, seasonal variability of the Black Sea water large-scale circulation.

**Keywords:** the Black Sea, monsoon effect, climate, climate modeling.