

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.466.3

В.В. Ефимов, А.Е. Анисимов, В.С. Барабанов

Климатическая структура поля ветра в Черноморском регионе

Для Черноморского региона выполнен динамический реанализ атмосферной циркуляции за период 1958 – 2001гг. с использованием модели *HadRM3P* с пространственным разрешением 25 км. Оценены среднеклиматические атмосферные поля завихренности и дивергенции скорости ветра. Рассмотрена их пространственная структура и сезонная изменчивость. Даны климатические оценки годового хода завихренности скорости ветра над морем. Полученные большие среднегодовые значения завихренности скорости свидетельствуют об определяющей роли ветрового воздействия в генерации не только сезонной изменчивости, но и средней циклонической циркуляции вод в Черном море.

Ключевые слова: климат, Черное море, реанализ, моделирование климата.

Введение

Данные о приповерхностном поле ветра в Черноморском регионе представляют интерес для решения многих научных и прикладных задач. Они необходимы при проектировании и строительстве инженерных сооружений, например ветровых электростанций, газо- и нефтедобывающих платформ в море, оценке степени загрязнения приморских городов. Расчет ветрового волнения и течений в море, мониторинг экологической обстановки также требует знаний о приповерхностном ветре. Если диагноз и краткосрочный прогноз текущей погоды в настоящее время достаточно обеспечены современными методами численного прогноза погоды, то климатические осредненные за достаточно большой промежуток времени (~30 лет) поля скорости изучены недостаточно. Наиболее полные сведения о таких климатических полях можно получать из известных массивов ретроспективного анализа *NCEP/NCAR*, *ERA-40* и др. [1, 2]. В то же время пространственного разрешения существующих данных глобального атмосферного реанализа (~125 км) недостаточно для изучения региональных особенностей с учетом сложной орографии и других неоднородностей подстилающей поверхности. Кроме того, грубое пространственное разрешение численного реанализа для регионов со сложным рельефом может исказить количественные характеристики атмосферной циркуляции. Поэтому необходимо использовать данные о ее параметрах с более высоким пространственным разрешением, которые были получены в результате ретроспективного анализа с использованием числен-

© В.В. Ефимов, А.Е. Анисимов, В.С. Барабанов, 2011

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2011, № 3

3

ной модели региональной атмосферной циркуляции и входных данных на основе массива глобального реанализа *ERA-40* за период 1958 – 2001 гг.

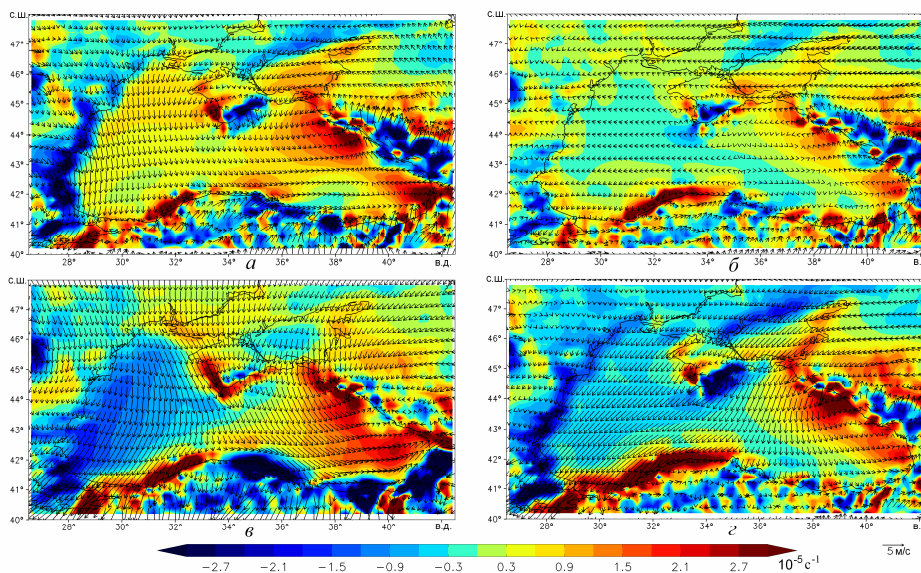
Численная модель

Реанализ выполнен в рамках программы численных экспериментов *PRECIS (Providing Regional Climate for Impact Studies)* [3], посвященной изучению региональных изменений климата в XXI в. с учетом антропогенного загрязнения атмосферы. Первым этапом наших экспериментов был региональный реанализ атмосферной циркуляции Черноморского региона за контрольный период 1958 – 1991 гг., который может служить базой для сравнения при последующей оценке изменений климата. Применялись известная методика вложенных сеток и региональная модель атмосферной циркуляции *HadRM3P* с пространственным разрешением 25×25 км во внутренней расчетной области. Параметризации физических процессов, используемые в региональной модели, идентичны используемым в глобальной модели *HadAM3P*, эксперимент с которой описан в [4]. Входными данными для внешнего домена были данные реанализа *ERA-40* с разрешением $\sim 125 \times 125$ км [2]. Отметим, что модель *HadRM3P* достаточно широко используется для численных расчетов региональной атмосферной циркуляции, ее характеристики и результаты применения для других регионов опубликованы (например, для Западной Европы – в [5]). Модель гидростатическая, число расчетных уровней в ней 17, что с учетом пространственного разрешения позволяло воспроизводить реакцию атмосферы на региональные особенности орографии и расположение береговой линии моря. Таким образом, этот региональный реанализ, имеющий почти на порядок большее пространственное разрешение по сравнению с данными *NCEP/NCAR*, может служить для дальнейшего развития работы [6] с целью более детального изучения сезонной изменчивости поля ветра и выделения его мезомасштабных особенностей, связанных с орографией и неоднородностями подстилающей поверхности (шероховатость, температура и др.). Основное внимание уделяется анализу поля завихренности приводного ветра, являющегося наиболее важным параметром, определяющим вертикальную скорость на нижней границе экмановского слоя и в целом – ветровую циркуляцию в море.

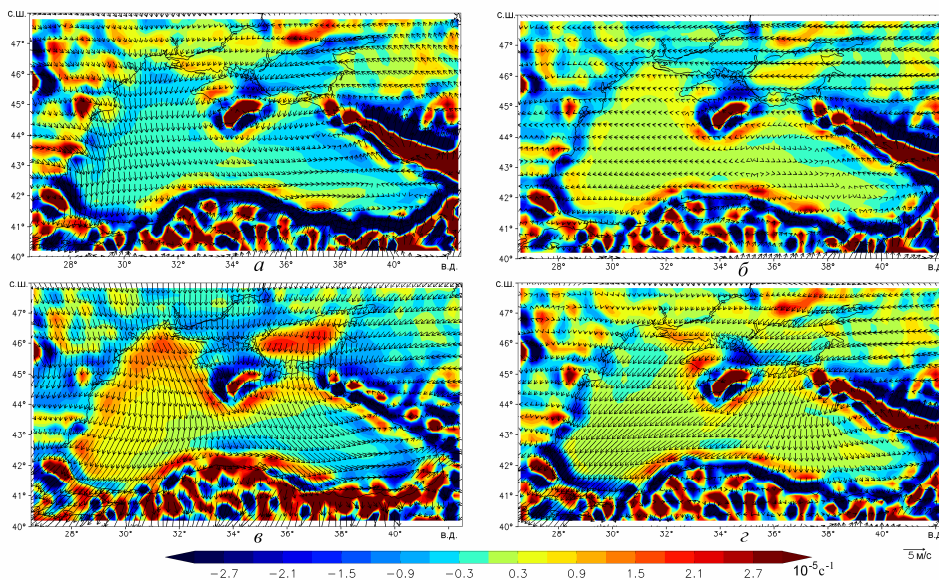
Пространственная структура и сезонная изменчивость поля ветра

Для анализа сезонной изменчивости завихренности и дивергенции приповерхностного ветра были выбраны срединные месяцы сезонов (январь, апрель, июль, октябрь), поскольку для них годовая изменчивость структуры поля ветра проявляется наиболее явно. Осреднение по сезонам несколько сглаживает сезонную изменчивость полей в годовом цикле. На рис. 1 показаны среднемесячные векторы приповерхностной скорости ветра и величины завихренности, на рис. 2 – векторы и дивергенция скорости. Как известно, завихренность скорости ветра определяет вертикальную экмановскую скорость в верхнем слое, а следовательно, и ветровую циркуляцию в море [7]. Дивергенция скорости, в свою очередь, определяет вертикальную скорость в атмосферном пограничном слое.

Как видно из рис. 1, 2, пространственная структура полей имеет достаточно сложный вид. В ней можно выделить мезомасштабные (несколько десятков км) и крупномасштабные (свыше 100 км) особенности. Мезомасштабные структуры связаны с орографией и краевыми эффектами вблизи берега. Они вызваны тепловыми контрастами на границе суша – море вследствие разности потоков тепла и различной шероховатости подстилающей поверхности. Ранее некоторые из них были рассмотрены в работе [6], основанной на анализе данных с более грубым разрешением на базе массива *NCEP/NCAR*.



Р и с. 1. Осредненные за период 1958 – 2001 гг. значения завихренности (показаны цветом) и векторы скорости ветра на высоте 10м для Черноморского региона в январе – *а*, апреле – *б*, августе – *в*, октябре – *г*. Масштаб скорости показан стрелкой в нижнем правом углу



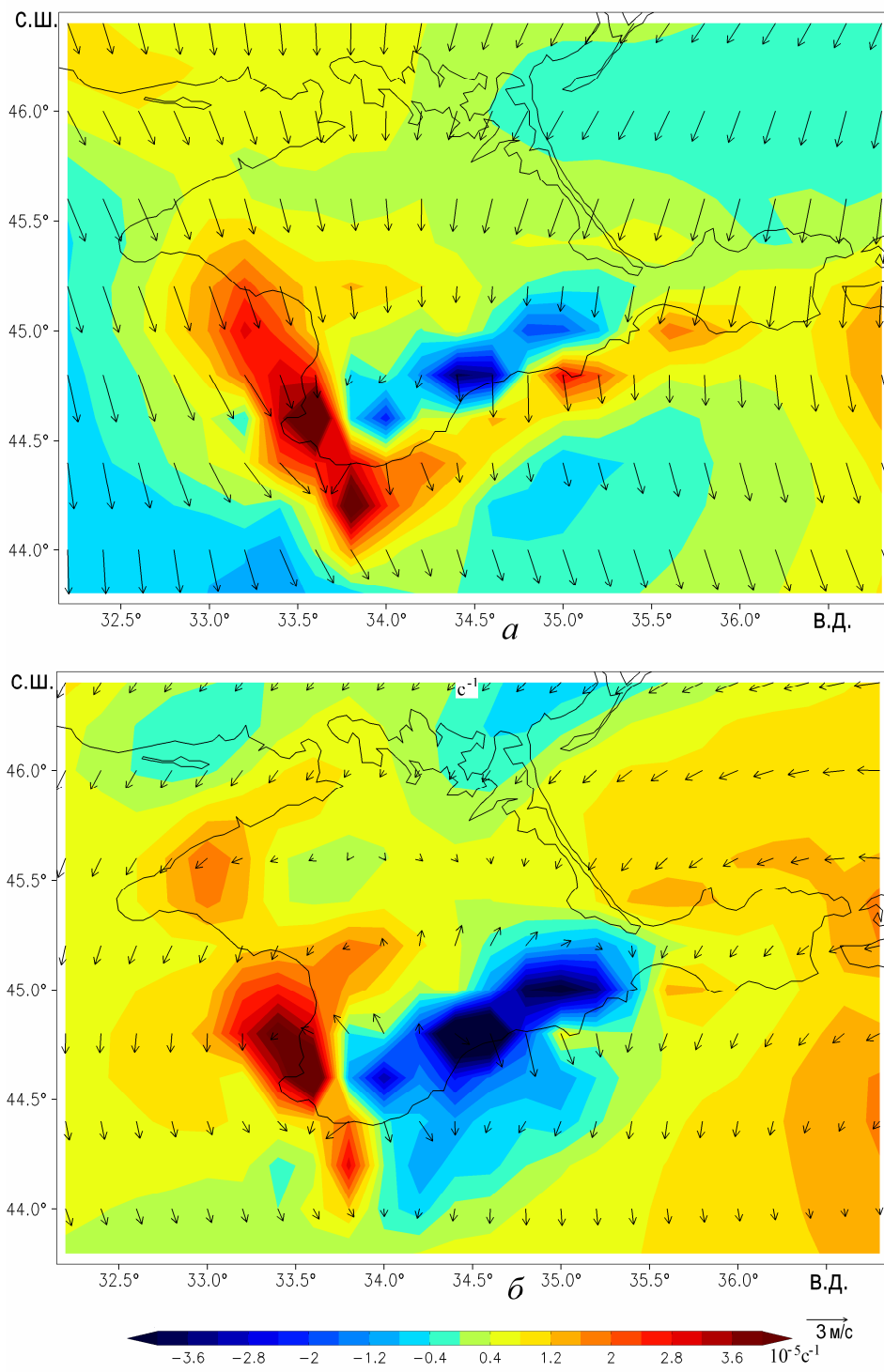
Р и с. 2. То же, что на рис. 1, для дивергенции скорости ветра в январе – *а*, апреле – *б*, августе – *в*, октябре – *г*

Не вдаваясь в детали, отметим некоторые локальные особенности поля скорости ветра. Во-первых, это краевые прибрежные зоны антициклонической завихренности в западной части Черного моря и на северном побережье Азовского. Они развиваются во все сезоны, кроме летнего, и связаны с перестройкой планетарного погранслоя в области границы суша – море [8]. В этих случаях средний ветер направлен с суши на море.

Во-вторых, это ряд орографических мезомасштабных структур. Над Крымскими, Кавказскими и Понтийскими горами развивается антициклоническая циркуляция во все сезоны года, усиливающаяся зимой. Механизм ее образования достаточно хорошо изучен. Он связан с общим законом сохранения потенциальной завихренности поля скорости ветра при обтекании гор [9]. Сезонная модуляция орографического эффекта определяется сезонными изменениями потоков явного тепла над горами [6]. В областях моря, примыкающих к Крыму, Кавказу и Понтийским горам, также во все сезоны года развиваются циклонические мезомасштабные структуры. Механизм их формирования в основном связан с особенностями обтекания гор воздушным потоком, хотя до настоящего времени он изучен недостаточно.

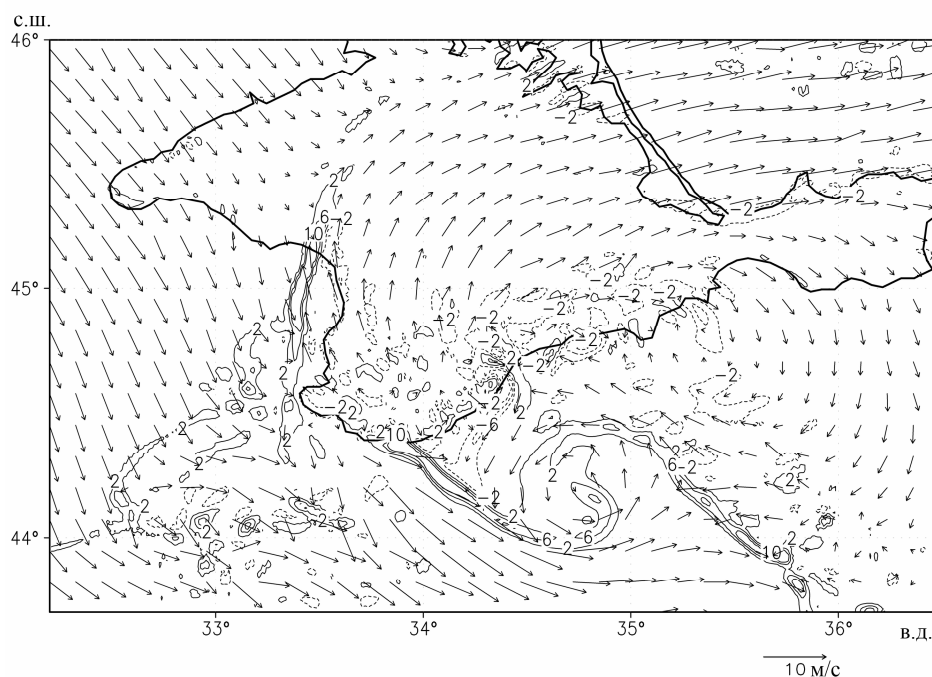
В качестве примера рассмотрим мезомасштабные структуры в Крымском регионе. На рис. 3 показаны поля скорости и завихренности для двух сезонов года. Как видно, в западной прибрежной части Крыма в течение зимы образуется локальная область сильной циклонической циркуляции, масштаб которой $\sim 30 - 50$ км, ее интенсивность несколько ослабевает лишь весной. В прибрежной части моря, вблизи Южного берега Крыма, в июне – июле также возникает область циклонической завихренности. В октябре – апреле (не показано) здесь формируется область антициклонической циркуляции. Отметим, что характерные значения завихренности скорости в этих локальных зонах составляют $(1 - 2) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, что в пересчете на завихренность напряжения ветра $\text{rot}_z \tau = \text{rot}_z (\rho_a C_n |\mathbf{u}| \mathbf{u})$, где ρ_a – плотность воздуха, $C_n = 1,5 \cdot 10^{-5}$ – коэффициент сопротивления, $|\mathbf{u}|$ – модуль приводной скорости ветра, дает значение $(2 - 4) \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^3$. Согласно известному соотношению для экмановской скорости подъема воды $W = \text{rot}_z \tau / \rho_w f$ (где ρ_w – плотность воды, f – параметр Кориолиса), на нижней границе пикноклина W составит $\sim (2 - 4) \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$. На месячных масштабах высота подъема изолинии более 5 м, в летний сезон это оказывает существенное влияние на формирование пространственно-временной структуры верхнего квазиоднородного слоя.

Отметим, что полученные приводные поля скорости и завихренности – это результат климатического осреднения отдельных синоптических ситуаций. Очевидно, что в каждом конкретном случае они различаются, в частности, их интенсивность может существенно превышать осредненную.



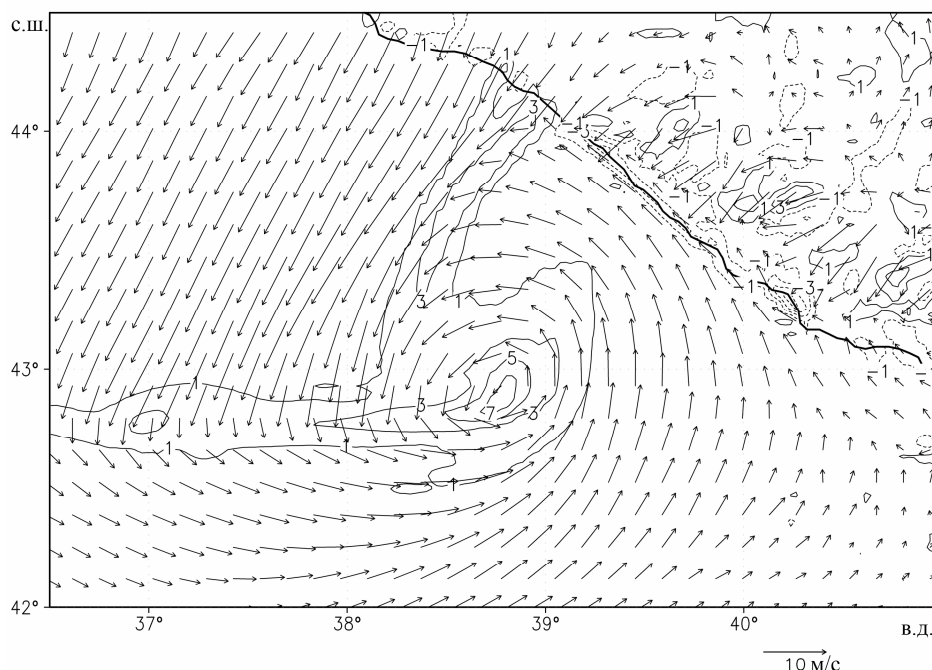
Р и с. 3. Среднемесячные значения завихренности и векторы скорости ветра на высоте 10 м для Крымского региона в летний – *а* и зимний – *б* сезоны

Рассмотрим на примерах, что могут представлять собой явления, которые при климатическом осреднении дают поля завихренности, показанные на рис. 1. Для этого приведем результаты численного расчета одного из таких синоптических случаев с использованием модели региональной атмосферной циркуляции *WRF* [10] с высоким пространственным разрешением, на вход которой подавались данные *GDAS*. Рассмотрим поля завихренности и скорости приповерхностного ветра, полученные для Крымского региона в модели с пространственным разрешением 3×3 км в летний период (16 августа 2007 г., 08.00 местного времени). На рис. 4 видно образование локального циклонического вихря над морем вблизи Южного берега Крыма. Это короткоживущий циклонический вихрь, время жизни которого составляет несколько часов. Он обусловлен совместным действием тепловых контрастов на границе суша – море и обтекания воздушными потоками Крымских гор. Отметим, что вихри вблизи Южного берега Крыма аналогичны вихревым цепочкам Кармана, возникающим за препятствием при обтекании его потоком. Такие локальные вихри образуются внутри планетарного пограничного слоя, их высота не превышает 2 км. Интенсивность этих вихрей, вообще говоря, нельзя считать малой. Так, максимальные значения завихренности достигают $\sim 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, генерируемая в море экмановская скорость может существенно влиять на локальные особенности формирования верхнего квазигомогенного слоя в летний период.



Р и с. 4. Значения завихренности и векторы скорости ветра на высоте 10 м для Крымского региона (16 августа 2007 г., 08.00 местного времени)

Второй пример, иллюстрирующий формирование области интенсивной циклонической завихренности в Кавказском регионе, приведен на рис. 5. Здесь численно воспроизведен мезомасштабный циклонический вихрь в модели региональной атмосферной циркуляции с разрешением 5×5 км. Как и ранее рассмотренный, это короткоживущий циклонический вихрь с временем жизни около суток, сформированный в планетарном пограничном слое атмосферы при переваливании воздушным потоком северо-западной оконечности Кавказского хребта [11]. Этот интенсивный вихрь также может вызывать значительные возмущения структуры верхнего перемешанного слоя и приводить к возникновению локальных областей апвеллинга в западной части Черного моря.



Р и с. 5. Значения завихренности и векторы скорости ветра на высоте 10 м для Кавказского региона (23 июля 2007 г., 00.00 местного времени)

Приведенные примеры показывают, структуры какого типа вызывают появление зон повышенной циклонической завихренности в районе Кавказа, Крыма и Понтийских гор (рис. 1).

Рассмотрим крупномасштабную структуру поля приповерхностного ветра. Отличительной особенностью является ее четкая привязка к береговой линии Черного моря с запада, юга и востока и включение Азовского моря в общую региональную черноморскую циркуляцию. Наиболее отчетливо это видно в зимний сезон, когда общерегиональная циклоническая циркуляция охватывает Черное и Азовское моря, включая также южные прибрежные области Украины. Крымский п-ов не нарушает общей циклонической структу-

ры этого крупномасштабного круговорота. Вдоль Кавказского побережья формируется интенсивная вдольбереговая воздушная струя.

В летний период влияние береговой линии на поля приповерхностного ветра, завихренности и дивергенции также заметно на западе, юге и востоке. На северной границе всего региона формируется приповерхностный поток воздуха, направленный в целом на юг. Влияние Крымского п-ова на эту крупномасштабную циркуляцию также незначительно. Вся восточная часть моря летом представляет собой западную периферию большого циклонического круговорота вокруг Кавказских гор.

На южной границе моря зимой среднеклиматический приводный ветер слабый, Понтийские горы (высотой ~2 – 3 км) являются для него преградой, которую он не может преодолеть [12]. В летний же период в результате формирования высокого конвективного планетарного пограничного слоя поверхностный ветер преодолевает Понтийские горы. Еще более высокие Кавказские горы препятствуют пересечению их поверхностным ветром, они отделяют окружающие сухопутные регионы от моря в течение всего года. Лишь на северо-западе Кавказского хребта ветры, дующие и над сушей, и над морем, пересекают эту прибрежную возвышенность.

Следует отметить, что описанная привязка крупномасштабной циркуляции к береговой линии моря и циклоническая циркуляция во всем Черноморском регионе в зимний период характерны только для нижней части атмосферы. Уже на высоте 2 – 3 км эти структуры искажаются, а на высоте ~5 км вообще не прослеживаются. Кроме того, эти структуры являются климатической особенностью, т. е. результатом осреднения за 44-летний промежуток времени. В конкретный синоптический период крупномасштабная картина полей скорости, завихренности и дивергенции, как правило, существенно отличается от осредненной. В отличие от короткоживущих вихрей, формирующихся над морем, другие мезомасштабные явления, связанные с орографией, гораздо менее изменчивы во времени.

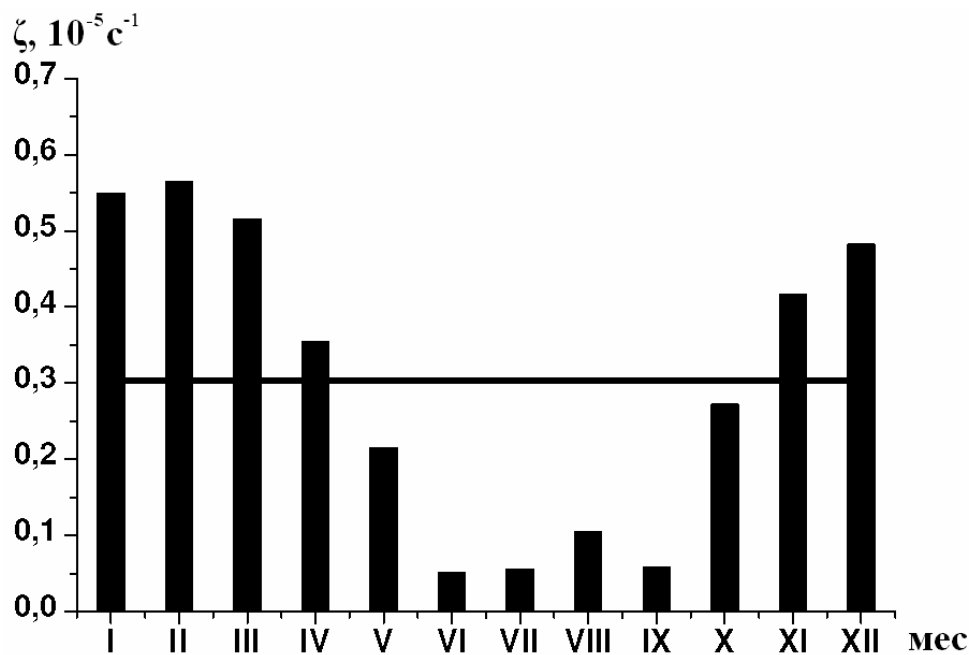
Характерной особенностью завихренности и дивергенции является их ярко выраженный сезонный ход. Как видно из рис. 1, 2, в годовом цикле зимняя циклоническая завихренность над всем морем сменяется летней антициклонической завихренностью. Но над восточной частью моря циклоническая циркуляция сохраняется во все сезоны года. Положительная дивергенция скорости, а следовательно, и направленная вниз вертикальная компонента скорости в планетарном пограничном слое также сохраняются на большей части моря во все сезоны года, кроме зимнего. Заметны зоны положительных значений дивергенции скорости над горами, где опускание воздуха прослеживается в течение всего года с максимальными значениями зимой.

Физическим механизмом, вызывающим сезонную изменчивость поля ветра, является муссонный эффект. Он заключается в годовом изменении контрастов в потоках явного тепла между морем и окружающей сушей. Зимой над более теплым морем поверхностный поток тепла нагревает атмосферу и создает дополнительную плавучесть воздуха по сравнению с воздухом над окружающей сушей. Это вызывает направленную вверх скорость и конвергенцию в нижней части атмосферы (рис. 2, *a*), где также возникает циклоническая циркуляция (рис. 1, *a*). Летом ситуация изменяется на противополо-

ложную, а над морем образуется антициклоническая циркуляция. В первом приближении муссонный механизм ответственен за сезонную изменчивость завихренности, но его вклад в среднегодовую завихренность невелик.

Причина возникновения больших среднегодовых значений циклонической завихренности связана с орографией. Высокие Кавказские и Понтийские горы являются причиной возникновения при обтекании их воздушным потоком дополнительной циклонической циркуляции в восточной половине моря.

На рис. 6 показан годовой цикл завихренности приводной скорости. Он имеет близкий к простому гармоническому закону вид. Отличительной особенностью являются гораздо большие среднегодовые значения, чем это было получено ранее по данным более грубого реанализа [6]. Обычно принималось, что сезонная изменчивость приводного ветра является основной причиной формирования годового хода общей циклонической циркуляции в Черном море. Но в формировании осредненной циклонической циркуляции определяющим считался халинный фактор. Поэтому большие значения среднегодовой завихренности (равные почти всему годовому диапазону изменчивости), полученные по данным реанализа с более высоким пространственным разрешением, позволяют предположить, что ветер играет основную роль не только в сезонной изменчивости, но и в формировании осредненной циклонической циркуляции в Черном море. Окончательный ответ может быть получен только путем численного моделирования циркуляции в море.



Р и с. 6. Годовой ход завихренности приводной скорости ветра за 1958 – 2001 гг. для Черного моря

Заключение

Результаты проделанной работы состоят в следующем:

- выполнен реанализ атмосферной циркуляции в Черноморском регионе с пространственным разрешением 25×25 км;
- получены климатические (осредненные за 44-летний промежуток времени) поля завихренности и дивергенции скорости для четырех сезонов года;
- рассмотрены особенности мезомасштабной структуры поля скорости, а также сезонной изменчивости завихренности, связанные с орографией и тепловыми контрастами между морем и окружающей сушей;
- численно рассчитаны характерные локальные циклонические вихри в краевых областях;
- получены численные оценки годового хода завихренности приводной скорости ветра над Черным морем. Большие среднегодовые значения завихренности скорости свидетельствуют об определяющем влиянии поля ветра на формирование не только сезонной изменчивости, но и осредненной циклонической циркуляции вод в Черном море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR. 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1996. – 77, № 3. – P. 437 – 471.
2. *Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 re-analysis // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. – 2005. – 131. – P. 2961 – 3012.
3. *Jones R.G., Noguer M., Hassel D.C. et al.* Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. – Met. Office Hadley Centre. Exeter. UK. – 2004. – 40 p.
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. *Christensen J.H., Christensen D.B.* A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century // Clim. Change. – 2006. – 81. – P. 7 – 30.
6. *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.
7. *Коротяев Г.К.* О причине сезонного хода циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 6. – С. 14 – 20.
8. *Зилитинкевич С.С.* Динамика пограничного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 296 с.
9. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986. – Т. 2. – 416 с.
10. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al.* A description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Technical Note. – Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center of Atmospheric Research. – 2008. – № 475. – 113 p.

11. Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А., Hein D. Статистика мезомасштабных циклонических вихрей над Черным морем // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 4. – С. 19 – 33.
12. Барри З.Г. Погода и климат в горах. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 312 с.

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

Материал поступил
в редакцию 25.01.10
После доработки 15.03.10

АНОТАЦІЯ Для Чорноморського регіону виконаний динамічний реаналіз атмосферної циркуляції за період 1958 – 2011 рр. з використанням моделі *HadRM3P* з просторовою роздільною здатністю 25 км. Оцінені середньокліматичні атмосферні поля завихреності та дивергенції швидкості вітру. Розглянута їх просторова структура і сезонна мінливість. Надані кліматичні оцінки річного ходу завихреності швидкості вітру над морем. Отримані великі середньорічні величини завихреності швидкості свідчать про значну роль вітрового впливу в генерації не тільки сезонної мінливості, але й середньої циклонічної циркуляції вод у Чорному морі.

Ключові слова: клімат, Чорне море, реаналіз, моделювання клімату.

ABSTRACT Dynamical reanalysis of atmospheric circulation for 1958 – 2001 is performed for the Black Sea region using *HadRM3P* model with the spatial resolution 25 km. Mean climatic atmospheric fields of vorticity and wind speed divergence are estimated. Their spatial structure and seasonal variability are considered. Climatic estimates of annual variation of above sea wind speed vorticity are given. The obtained high average annual values of speed vorticity testify to the determinant role of wind impact upon generation of seasonal variability and mean cyclonic water circulation in the Black Sea.

Keywords: climate, the Black Sea, reanalysis, climate modeling.