

# ЛИНЕЙНОЕ И НЕЛИНЕЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ

**В.С.Барабанов, В.В.Ефимов,  
М.В.Шокуров**

Морской гидрофизический институт НАН  
Украины, Севастополь, Капитанская 2,  
vao@alpha.mhi.iuf.net

Температурный контраст между морем и сушей определяет мезомасштабные особенности атмосферной циркуляции над Черным морем, важные для задач прогнозирования осадков и моделирования морских течений. Проводится сравнение результатов линейной и нелинейной моделей атмосферной циркуляции по полям вертикальной скорости и завихренности ветра для идеальных случаев с заданной скоростью ветра и температурным контрастом на подстилающей поверхности.

Анализ особенностей атмосферной циркуляции над Чёрным морем, обусловленных температурным контрастом между морем и сушей, важен в исследованиях ветровой циркуляции вод моря [1], а также для корректного расчёта осадков в прибрежной зоне на основе мезомасштабных моделей атмосферы. В предположении, что орографический фактор не действует (при моделировании используется плоский рельеф), эти эффекты могут быть оценены в линейной теории. Для линеаризации базовых уравнений будем использовать следующие упрощения: на  $f$ -плоскости рассматривается установившийся поток сухого атмосферного воздуха над постоянным двумерным источником тепла, выполняются приближения Буссинеска и несжимаемости, принимается, что коэффициент вертикального турбулентного обмена теплом  $K$  постоянен, трение описывается в рэлеевском приближении, отклонения скорости ветра ( $u, v, w$ ) от заданных значений ( $U, V, 0$ ) в системе координат  $(x, y, z)$  незначительны, потенциальная температура в базовом состоянии равна  $\theta_0$ . Соответствующая система уравнений может быть записана в виде [2]:

$$U \frac{\partial u}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial y} = -\theta_0 \frac{\partial \pi}{\partial x} + fv - \sigma u$$

$$\begin{aligned} U \frac{\partial v}{\partial x} + V \frac{\partial v}{\partial y} &= -\theta_0 \frac{\partial \pi}{\partial y} - fu - \sigma v \\ \lambda(U \frac{\partial w}{\partial x} + V \frac{\partial w}{\partial y}) &= -\theta_0 \frac{\partial \pi}{\partial z} + \frac{g\theta}{\theta_0} - \lambda \sigma w \\ U \frac{\partial \theta}{\partial x} + V \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\partial \theta_0}{\partial z} w &= K \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \end{aligned}$$

где  $\sigma$  - коэффициент трения,  $\lambda$  - коэффициент, равный 1 для негидростатического варианта системы или 0 для гидростатического, потенциальная температура  $\theta$  и нормированное давление  $\pi$  определяются по формулам

$$\theta = T \left( \frac{p_*}{p} \right)^{R/C_p}, \quad \pi = C_p \left( \frac{p_*}{p} \right)^{R/C_p}$$

где  $p$  и  $T$  – давление и температура,  $p_*=1000$  мбар,  $R$  – газовая постоянная,  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Границные условия могут быть представлены в следующем виде:  $w=0$  при  $z=0$  и  $z \rightarrow \infty$ ,  $\theta=0$  при  $z \rightarrow \infty$ ,  $\theta(0)=f(x, y)$ .

Эта система уравнений решается аналитически с использованием Фурье-преобразования, в книге [3] приведены соответствующие выкладки.

Нами была построена трехмерная линейная модель для Черного моря со ступенчатым профилем зоны нагрева (температура суши считалась постоянной и равной  $\theta_0$ , температура моря превышала ее на  $\Delta\theta$ ) со следующими параметрами, взятыми из работы [2]: вертикальный градиент температуры постоянный и равен  $2,786$  К/км,  $K=100$  м $^2$ /с,  $f=10^{-4}$  с $^{-1}$ ,  $\sigma=10^{-3}$  с $^{-1}$ ,  $\theta_0=273$  К,  $\Delta\theta=5$  К,  $U=7$  м/с,  $V=0.01$  м/с. Результаты расчёта вертикальной скорости ветра приведены на Рис.1. Как видно, влияние температурного контраста на поле вертикальной компоненты скорости ветра ограничивается зоной вдоль берега, где образуется ячейка циркуляции с положительной вертикальной скоростью над морем и отрицательной – над сушей.

Однако, в линейных моделях не учитываются многие важные эффекты, в частности, нестационарность циркуляции. Влажность и осадки также не рассматривались. В настоящее время с целью прогноза погоды и климата на ограниченной территории разработан целый ряд нелинейных численных моделей,

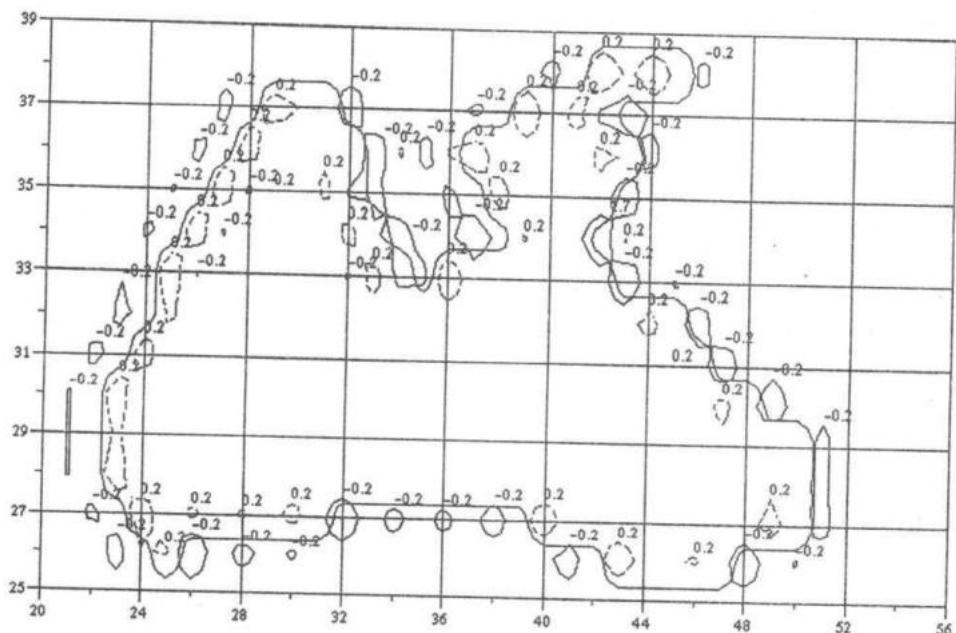


Рис. 1 - Линейная модель: вертикальная компонента скорости ветра, см/с, на высоте 40 м.

учитывающих, насколько это возможно, все основные физические процессы, формирующие циркуляцию атмосферы на мезомасштабах. В настоящем исследовании используется негидростатическая модель MM5 [4] версии 3.4, исходный код которой доступен по сети Интернет по адресу [www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html](http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html). На основе этой модели были выполнены расчеты полей завихренности приводного ветра и вертикальной скорости, как в идеальном случае (плоский рельеф, заданное направление ветра), так и для реальных синоптических ситуаций для января 1996 г. с использованием данных реанализа NCEP/NCAR [5], полученных с сайта [www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov). В последнем случае использовалось два домена, центрированных относительно точки с координатами  $45^{\circ}$  с.ш. и  $35^{\circ}$  в.д.; для большего домена с сеткой  $41 \times 35$  точек шаг составлял 90 км, для меньшего с сеткой  $52 \times 49$  точек – 30 км. По вертикали имелось 23 неравномерно расположенных уровня.

Данные по температуре поверхности моря были получены путем интерполяции на сетку модели массива с пространственным разрешением  $1^{\circ}$ ,

полученного с сайта [www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov) (массив Рейнольдса), при этом было обеспечено корректное задание температуры в прибрежной зоне.

В идеальном случае задавались условия, примерно соответствующие взятым в линейной модели. Так, температура суши составляла 275 К, температура воды – 280 К. По заданному профилю вертикального градиента температуры (около 4 К/км до 10 км высоты, выше задавался нулевой градиент) рассчитывался термический ветер, который имел постоянное направление с востока на запад, скорость ветра на нижнем уровне модели была около 7 м/с. Эти численные эксперименты показали существенную нестационарность циркуляционных ячеек, связанных с термическим контрастом. За весь срок моделирования (более 10 суток) не наблюдалось установления циркуляции. В начальный период возникала вытянутая вдоль береговой линии зона конвергенции, которая затем образовывала отдельные ячейки, перемещающиеся по направлению ветра, интенсивность циркуляции в которых усиливалась при прохождении над поверхностью моря, а над сушей

происходил их постепенный распад. Затем процесс повторялся. Средняя за весь срок вертикальная скорость на нижнем уровне модели (около 40 м над морем) представлена на рис.2.

Задание реалистичного рельефа приводит к образованию стационарных ячеек циркуляции, связанных с горами Крыма и Кавказа. Они хорошо заметны и на среднемесячных картах при моделировании реальных синоптических ситуаций.

Так, на рис.3 представлена среднеянварская вертикальная скорость на нижнем уровне модели за 1996 г. Логично предположить, что стационарные ячейки циркуляции связаны в основном с рельефом. Термическим контрастом, в свою очередь, объясняется повышение фонового уровня завихренности над морем, а также ячейки циркуляции в прибрежной зоне с максимальной вертикальной скоростью менее 1 см/с. Эти предположения были подтверждены

непосредственной проверкой. Конкретно для января 1996 года проводилось моделирование с реалистичным и плоским рельефом, а также исследовалось влияние температуры поверхности моря на среднюю за месяц карту завихренности. Подстановка плоского рельефа приводит к исчезновению характерных для рис.3 ячеек циркуляции вблизи гор и восстановлению определяемой термическим контрастом структуры циркуляции, представленной на рис.2.

**Заключение.** В рамках линейной и нелинейной моделей исследованы характерные мезомасштабные особенности поля вертикальной компоненты скорости ветра над Черным морем. Нелинейное моделирование показало, что возникающие из-за термического контраста ячейки циркуляции (предсказываемые также и линейной моделью) дают вклад и в увеличение фоновой завихренности над

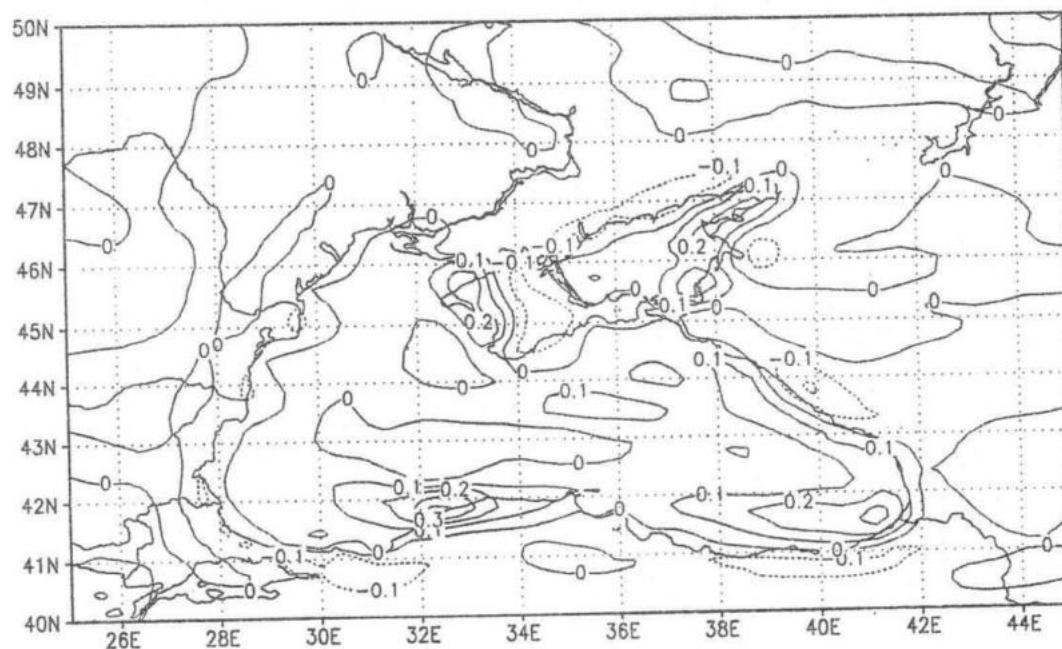


Рис. 2 - Нелинейная модель, плоский рельеф: средняя вертикальная компонента скорости ветра, см/с.

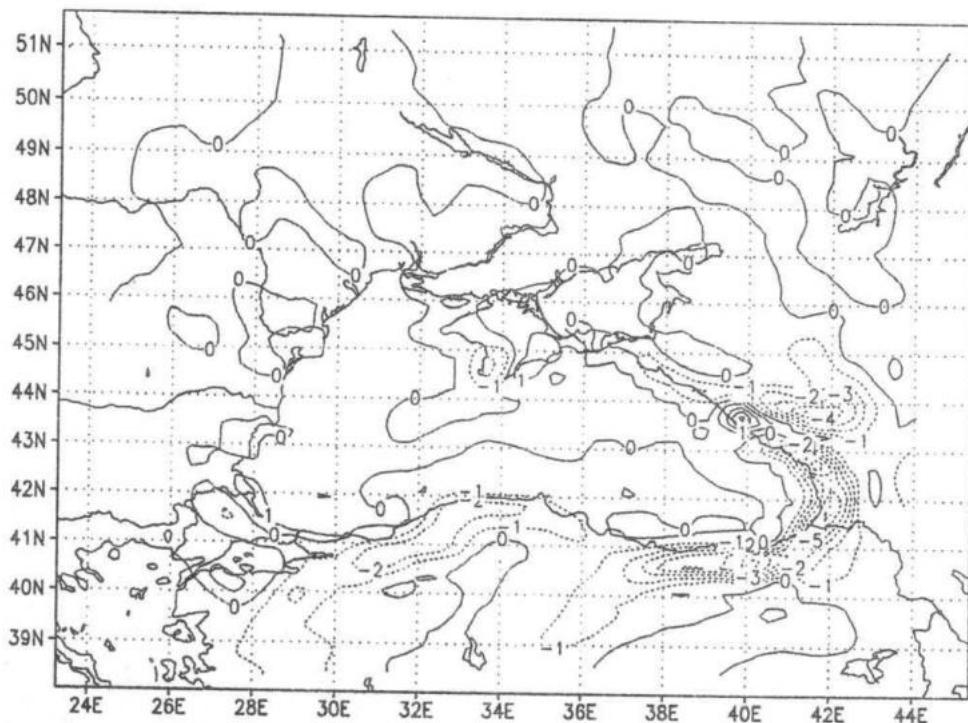


Рис. 3 - Средняя вертикальная компонента скорости ветра, см/с, за январь 1996 года (результат мезомасштабного моделирования с реалистичной орографией).

морем. Стационарные ячейки циркуляции с гораздо большими значениями вертикальной скорости связаны с рельефом (горами Крыма и Кавказа). Дальнейшее развитие численных моделей требует существенного расширения базы наблюдений, включая спутниковые.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В.В., Шокуров М.В., Барабанов В.С. Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей Изв. АН, Физика атмосферы и океана, 2002, 38. - С. 247-258.

2. Hsu H.-M. Mesoscale Lake-effect Snowstorms in the Vicinity of Lake Michigan: Linear Theory and Numerical Simulations, J. Atmos.Sci., 44. - P. 1019-1040.

3. Pielke R.A. Mesoscale Meteorological Modeling, 1984, Academic Press. - 353 с.

4. Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, Mon.Wea.Rev. (1993), 121. - P. 1493-1513

5. Kalnay E., Kanamitsu M. et al. The NCEP/NCAR 40- Year Reanalysis Project, Bull. Amer. Meteor. Soc. (1996), 77. - 104 с.