

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ
ТЕЧЕНИЙ В МОДЕЛИ
ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ
С ВЫСОКИМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ
РАЗРЕШЕНИЕМ**

О.А. Дымова

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net

Выполнен численный эксперимент по моделированию гидрофизических полей Черного моря с разрешением 1,64 × 1,64 км в период январь-сентябрь 2006 г. с использованием реального атмосферного воздействия. Вертикальный турбулентный обмен и вертикальная турбулентная диффузия параметризуются на основе теории Меллора-Ямады. Проведен анализ полученных вертикальных скоростей течений.

Введение. Вертикальная скорость является важным фактором, влияющим на структуру крупномасштабной циркуляции в Черном море. Ее изменчивость, обусловленная реальными граничными условиями, представляет прикладной и научный интерес. Также адекватное описание вертикальных движений свидетельствует и о репрезентативности используемой численной модели. Представленная работа посвящена анализу вертикальных скоростей движения, которые получены в результате численного эксперимента по моделированию гидрофизических полей Черного моря с разрешением 1,64 км по горизонтали и реальным атмосферным воздействием.

Численный эксперимент. Для выполнения численного эксперимента использовалась трехмерная нелинейная термогидродинамическая модель МГИ. Уравнения модели и граничные условия подробно описаны в работе [1]. Главное отличие от модели [1] состоит в способе описания верхнего перемешанного слоя. Здесь коэффициенты вертикального турбулентного обмена импульсом ν^V и вертикальной турбулентной диффузии тепла и соли k^V вычисляются в соответствии с параметризацией Меллора-Ямады 2.5 [2] из следующих соотношений:

$$\nu^V = leS_H, \quad k^V = leS_M, \quad (1)$$

где $e^2/2$ – кинетическая энергия турбулентности; l – макромасштаб турбулентности; S_H, S_M – функции устойчивости, которые определяются из эмпирических соотношений. В параметризации Меллора-Ямады ветер и потоки плавучести учитываются непосредственно, что может обеспечить более правильное моделирование параметров верхнего перемешанного слоя и, тем самым, более точный прогноз гидрофизических полей Черного моря.

Таким образом, основная система уравнений модели дополнена двумя уравнениями для определения величин e^2 и l :

$$\frac{de^2}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu^V \frac{\partial e^2}{\partial z} \right) + 2\nu^V \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} k^V \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2e^3}{B_1 l} - \nu^e \nabla^4 e^2, \quad (2)$$

$$\frac{d(e^2 l)}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu^V \frac{\partial (e^2 l)}{\partial z} \right) + l E_1 \nu^V \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{l E_3 g}{\rho_0} k^V \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{e^3}{B_1} H - \nu^e \nabla^4 (e^2 l), \quad (3)$$

$$\mu^V = leS_e, \quad (4)$$

где H – эмпирическая функция; E_1, E_3, B_1 – эмпирические константы; $S_e = 0,2$. Для уравнений (2) – (4) ставятся следующие краевые и начальные условия:

$$e^2 = B_1^{2/3} \left[(\tau^x + \tau^y) / \rho_0^2 \right]^{1/2},$$

$$e^2 l = 0, \quad z = 0,$$

$$e^2 = 0, \quad e^2 l = 0, \quad z = H(x, y),$$

$$e = e^0, \quad l = l^0, \quad t = t^0.$$

В качестве начальных полей использовались поля температуры, солёности, уровня и скоростей течений, полученные в работе [3]. Начальный момент соответствовал 2 января 2006 г. Расчеты проводились на горизонтальной сетке 1,64 × 1,64 км, по вертикали использовалось 27 горизонтов, шаг по времени равнялся 1,5 мин.

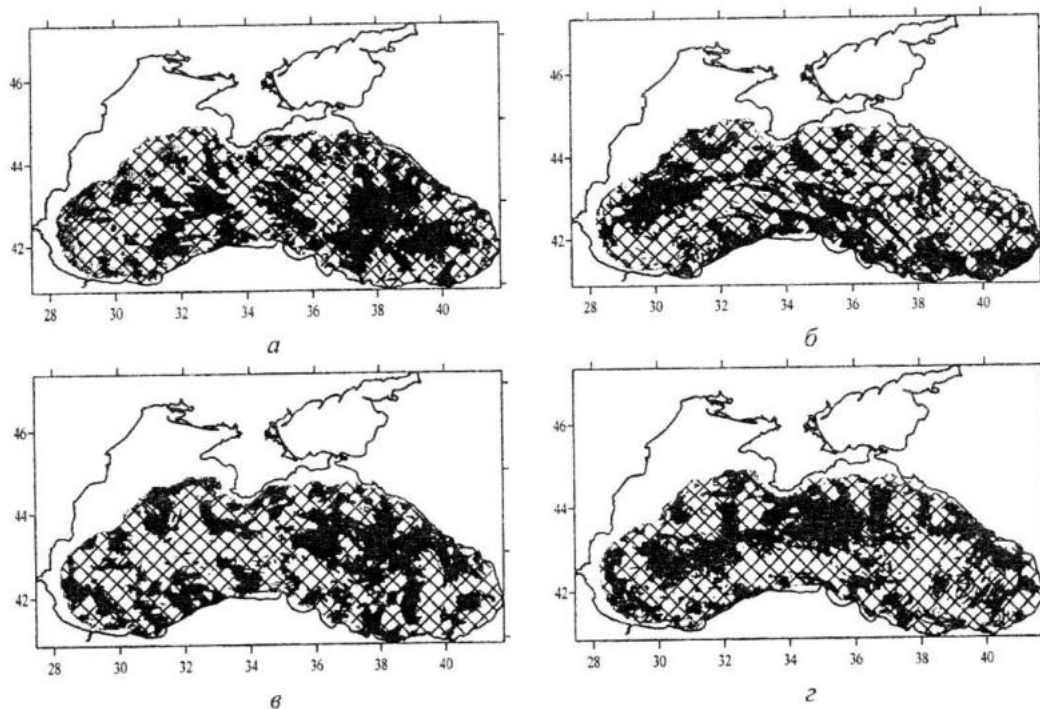
На поверхности моря каждые сутки задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, осадков и испарения, полученные по данным региональной атмосферной модели "Alladin" [4]. Также на поверхности моря каждые сутки усваивалась спутни-

ковая поверхностная температура (SST), которая была получена по данным спутника NOAA, принимаемая и обрабатываемая в центре приема спутниковой информации МГИ НАН Украины [4]. Для задания температуры и скорости в устьях рек и проливах использовались климатические данные [5]. В расчете задавалось, что в верхнебосфорском течении температура и соленость та же, что и в море. В нижнебосфорском потоке соленость принималась равной 35 ‰ и температура – 16 °С, что соответствует характеристикам вод Мраморного моря. При проведении расчетов граничные поля линейно интерполировались на каждый момент времени. Интегрирование уравнений модели проводилось до 29 сентября 2006 г.

Анализ результатов. В результате численного эксперимента были получены поля скоростей, уровня, температуры и солености. Отметим наиболее интересные черты горизонтальной циркуляции Черного моря, которые возникли под действием реальных атмосферных условий. Зимой наблюдается увеличение скорости ОЧТ. Циклонический круговорот охватывает практически всю центральную часть моря. Севастопольский антициклон смещается вниз по течению. В конце зимы к юго-западу от Крыма

формируется новый антициклон, который сопровождается циклоническим образованием. В конце февраля – начале марта формируется Батумский антициклон. Весной наблюдается интенсивная вихревая активность возле побережья Кавказа и вдоль Анатолии. К концу мая ширина ОЧТ увеличивается, внутри основного циклонического круговорота формируются многочисленные мезомасштабные вихри различного знака завихренности. Летом в западной части моря локализуется устойчивый антициклон синоптического масштаба. К концу лета – началу осени наиболее интенсивные движения наблюдаются в районе Батумского антициклона и вдоль побережья Турции. В сентябре Батумский антициклон распадется на несколько вихрей меньшего масштаба и различного знака завихренности.

Далее рассмотрим поля вертикальной скорости в верхнем 500-метровом слое моря. В целом для всего расчета порядок величин вертикальной скорости составляет 10^{-3} см/с, а также наблюдается сильная перемежаемость зон подъема и опускания вод. Карты вертикальных скоростей течений в характерные сезоны на горизонте 100 м представлены на рис. 1. Темным цветом обозначены области подъема вод.

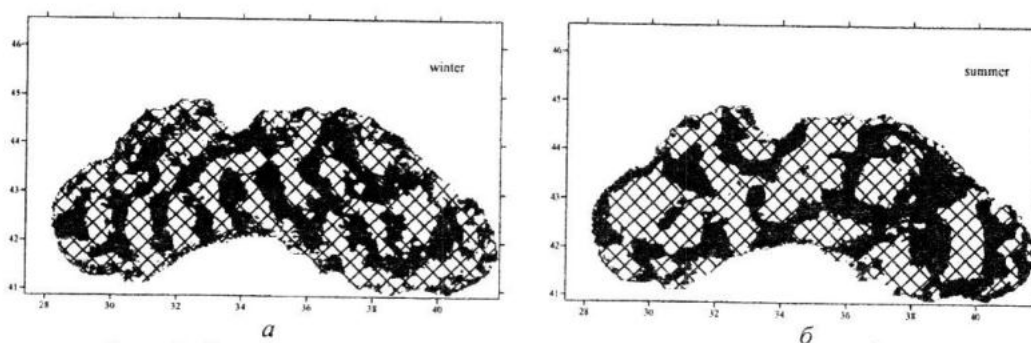


Р и с. 1. Вертикальная скорость на горизонте 100 м:
а – 08.02.06; б – 12.05.06; в – 28.07.06; з – 07.09.06

В феврале (рис. 1а) наблюдается интенсификация восточного циклонического круговорота, и площадь подъема вод здесь значительно превосходит область подъема вод в районе западного циклонического круговорота. Вдоль западного материкового склона преимущественно наблюдается опускание вод. Весной (рис. 1б) формируется Батумский антициклон, скорости горизонтальных течений возрастают и в этом районе происходит значительное опускание вод. Также наблюдается обширный апвеллинг вдоль южного материкового склона. В восточной части моря преобладает подъем вод. В июле (рис. 1в) снова усиливается подъем вод в восточной части моря. В районах Севастопольского и Батумского антициклонов вода опускается,

а вдоль Кавказского побережья поднимается. В сентябре (рис. 1г) подъем вод наблюдается преимущественно в центральной части моря. Осенью горизонтальные скорости течений в районе Батумского антициклона максимальны во всем море и здесь наблюдается обширный даунвеллинг. При этом возле Кавказа вода поднимается.

Для всего периода интегрирования характерно преимущественное опускание вод в зонах Севастопольского и Батумского антициклонов. В центральной части моря наблюдается сезонная изменчивость в усилении подъема или опускания вод в соответствии с интенсивностью восточного или западного циклонического круговорота.



Р и с. 2. Осредненная за сезон вертикальная скорость на горизонте 100 м:
а – зима; б – лето

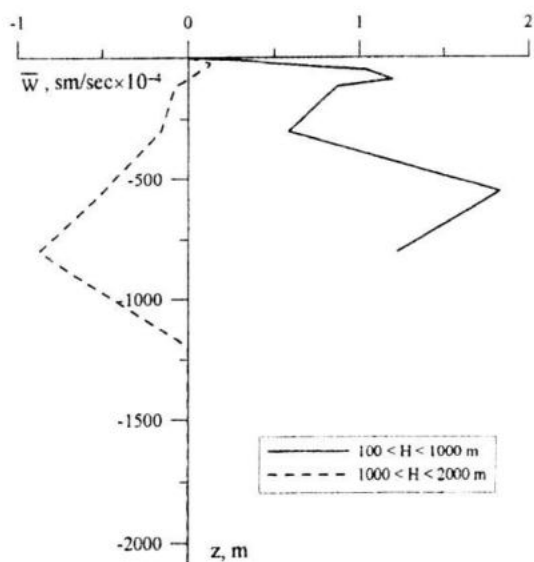
Осредненные за сезон вертикальные скорости течений на горизонте 100 м дают представление о внутригодовой и сезонной изменчивости полей вертикальных движений в Черном море. Зимой (рис. 2а) площади подъема и опускания вод примерно одинаковы. По периферии бассейна вода преимущественно опускается. В районе Севастопольского антициклона и на юго-востоке преобладает опускание вод. Летом (рис. 2б) в западной части моря наблюдается опускание вод, для восточной части характерен подъем вод и обширный апвеллинг возле Кавказа. В районах Севастопольского и Батумского антициклонов преобладает опускание вод.

На рис. 2а обращает на себя внимание юго-западная часть моря, где наблюдается чередование зон подъема и опускания вод в зональном направлении. В работе [6] показано, что в основном бароклинном слое Черного моря наблюдается пространственно-временная из-

менчивость неоднородностей динамической топографии, которая имеет квазипериодический (волновой) характер с периодом 2 – 4 месяца. Такая изменчивость обладает наибольшей энергией и преобладает в холодную половину года.

Важной характеристикой структуры полей вертикальных движений является осредненный по времени профиль вертикальной скорости, который получен интегрированием по пространству осредненного поля вертикальной скорости в двух характерных зонах моря: области, примыкающей к материковому склону и ограниченной изобатами 100 и 1000 м; и области, ограниченной изобатами 1000 и 2000 м, где характерна циклоническая завихренность. На рис. 3 представлены осредненные за период интегрирования профили вертикальной скорости для проведенного эксперимента. Видно, что в среднем за период интегрирования в зоне, примыкающей к материковому склону, вода поднимается. Для глубоко-

водной части моря до глубин 50 м наблюдается подъем вод. Для нижних горизонтов характерно опускание вод по всей глубине. Максимальные значения осредненной вертикальной скорости наблюдаются на глубинах 500 – 1000 м для обеих зон. В зоне, примыкающей к материковому склону, абсолютные величины вертикальной скорости выше, чем в глубоководной части.



Р и с. 3. Осредненные профили вертикальной скорости в двух зонах моря

Выводы. По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Значения вертикальной скорости в верхнем 500-метровом слое имеют порядок 10^{-3} см/с. Для горизонтального распределения вертикальной скорости характерна сильная пространственная перемежаемость зон подъема и опускания вод. В районах Севастопольского и Батумского антициклонов преобладает опускание вод во все сезоны. Также преимущественное опускание вод наблюдается и по периферии бассейна.

В среднем за зиму площади подъема и опускания вод примерно одинаковы. В юго-западной части моря наблюдается чередование зон подъема и опускания вод в зональном направлении. Летом в западной части моря преобладает опускание вод, подъем в восточной части и апвеллинг возле Кавказа. В зоне примыкающей к материковому склону ($100 < H < 1000$ м) преобладает опускание вод по всей глубине. Для глубоководной части моря ($1000 < H < 2000$ м)

до глубин 50 м наблюдается опускание вод. Ниже характерен подъем вод по всей глубине.

В целом полученные данные соответствуют общепринятым представлениям о вертикальных движениях в Черном море. В проведенном эксперименте наблюдается подъем вод в центральной части моря и опускание по периферии. Таким образом, воспроизводиться один из основных механизмов поддержания крупномасштабной циркуляции. Влияние же реальных атмосферных условий проявляется в формировании мезомасштабных особенностей горизонтальных и вертикальных движений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьшев С.Г., Дымова О.А. Результаты прогностического расчета гидродинамических полей Черного моря с высоким пространственным разрешением // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2010. – Вып. 22 – С. 22 – 30.
2. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – 20. – P. 851 – 875.
3. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанографию Черного моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2006. – 382 с.
4. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., Ратнер Ю.Б. Система мониторинга гидродинамических полей Черного моря в квазиоперативном режиме // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – С. 150 – 158.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Гидрометеорологические условия. Выпуск 1. – С.-П.: Гидрометеоиздат, 1991. – 428 с.
6. Еремеев В.Н., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С. Климатическая внутригодовая изменчивость геострофической циркуляции вод Основного черноморского течения // Морской гидрофизический журнал. – 1992. – № 3. – С. 55 – 73.