

**РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЙ В ЧЕРНОМ И  
МРАМОРНОМ МОРЯХ  
С УЧЕТОМ РЕК И ПРОЛИВОВ  
НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ  
НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ**

*С.Г.Демышев, С.В.Довгая, О.А.Дымова,  
Н.В.Маркова*

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

*В работе исследуются течения в Черном и Мраморном морях, построенные на основе численной вихреразрешающей гидродинамической модели. Проведен анализ их пространственной структуры и временной изменчивости. Получены качественные и количественные оценки струйных течений, циклонических и антициклонических вихрей.*

Численное моделирование гидродинамических процессов, происходящих в незамкнутых морях, представляет прикладной и научный интерес. Указанная группа авторов занимается исследованием течений в Черном и Мраморном морях, полученных на основе численной вихреразрешающей гидродинамической модели [1].

1. Целью первой части работы является изучение развития течений под воздействи-

ем потоков импульса через боковые границы в бассейне простой геометрической формы.

Рассматривается прямоугольный бассейн ( $a \times b$ ) переменной глубины (1) с двумя проливами шириной  $2l$ , который заполнен однородной жидкостью. Здесь

$$h(x, y) = h_1 + h_0 \sin(\pi x / a) \sin(\pi y / b), \quad (1)$$

где  $h_1$  – глубина пролива,  $h_0$  – максимальная глубина бассейна. Движение жидкости описывается уравнениями линейной теории длинных волн [2]. На твердой части границы выполняется условие прилипания, а в проливах распределение скорости  $u(x, y, t)$  задано в виде:

$$u(0, y, t) = u(a, y, t) = u_0 \cos^2\left(\frac{\pi(y-b_1)}{2l}\right) \sin \sigma t, \\ (b_1 - l \leq y \leq b_1 + l), \quad (2)$$

где  $u_0$  – максимальное значение скорости в проливе,  $\sigma$  – частота внешнего воздействия. Задача решается с нулевыми начальными условиями.

Для решения поставленной задачи использовались численные методы. При этом конечно-разностный аналог уравнений движения можно записать в виде (3), где индекс  $n$  – показывает временной уровень,  $\Delta t$  – шаг по времени,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – шаги по пространству:

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n}{\Delta t} = - \frac{(u_{i+1,j}^{n+1}(h_{i,j} + h_{i+1,j}) - u_{i,j}^{n+1}(h_{i,j} + h_{i-1,j}))}{2\Delta x} - \frac{(v_{i,j+1}^{n+1}(h_{i,j} + h_{i,j+1}) - v_{i,j}^{n+1}(h_{i,j} + h_{i,j-1}))}{2\Delta y}, \\ \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^{n-1}}{2\Delta t} = - \frac{g}{\Delta x} (\zeta_{i,j}^{n+1} - \zeta_{i-1,j}^{n+1}) + v \left( \frac{u_{i+1,j}^{n-1} - u_{i,j}^{n-1}}{\Delta x^2} - \frac{u_{i,j}^{n-1} - u_{i-1,j}^{n-1}}{\Delta x^2} \right) + v \left( \frac{u_{i,j+1}^{n-1} - u_{i,j}^{n-1}}{\Delta y^2} - \frac{u_{i,j}^{n-1} - u_{i,j-1}^{n-1}}{\Delta y^2} \right), \quad (3) \\ \frac{v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^{n-1}}{2\Delta t} = - \frac{g}{\Delta y} (\zeta_{i,j}^{n+1} - \zeta_{i,j-1}^{n+1}) + v \left( \frac{v_{i+1,j}^{n-1} - v_{i,j}^{n-1}}{\Delta x^2} - \frac{v_{i,j}^{n-1} - v_{i-1,j}^{n-1}}{\Delta x^2} \right) + v \left( \frac{v_{i,j+1}^{n-1} - v_{i,j}^{n-1}}{\Delta y^2} - \frac{v_{i,j}^{n-1} - v_{i,j-1}^{n-1}}{\Delta y^2} \right).$$

Численные эксперименты проводились для различных типов расположения проливов, и изучалось влияние геометрических характеристик бассейна на время установления и скорость установившихся колебаний. Рассматривались волны с периодами 12 и 24 ч. Эксперимент показал, что увеличение глубины пролива приводит к увеличению амплитуды волновой скорости. Изменяется также и вид волновой поверхности. Коор-

динаты проливов влияют на величину скорости, но при этом качественно вид волновой поверхности не меняется. По данным расчетов были построены поля волновых скоростей в случае установившихся колебаний (рис. 1). Размер и направление стрелки соответствуют модулю и направлению вектора  $\mathbf{V}$ . Из рис. 1 видно, что вектор волновой скорости распределен неравномерно по поверхности бассейна.

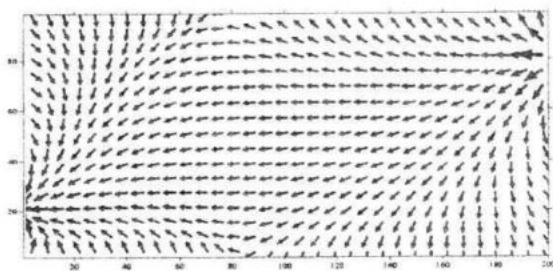


Рис. 1 – Структура течения после установления колебаний

Для периода 12ч максимальный размер стрелки отвечает значению скорости 6 см/с. Максимальных значений скорость достигает в проливах. Для 24 ч значение вектора скорости равно 4 см/с. Представленная выше схема позволяет построить численную модель, работающую с большим шагом по времени, что значительно сокращает время проведения численного эксперимента. Анализ результатов показал, что геометрия бассейна оказывает существенное влияние на структуру течения. Увеличение периода внешнего воздействия вызывает уменьшение амплитуды волновой скорости и увеличение времени установления колебаний, но вид волновой поверхности при этом меняется незначительно.

2. Мраморное море является буферным между Черным и Средиземным морями. Через него осуществляется транспорт соленых и теплых средиземноморских вод в Черное море и более холодных и опресненных черноморских в Средиземное. Поэтому адекватное моделирование циркуляции в Мраморном море позволит правильно воспроизвести характеристики поступающих вод в проливы Босфор и Дарданеллы и, следовательно, в Черное и Средиземное моря.

В настоящей работе используется численная нелинейная трехмерная модель [1], которая была адаптирована к условиям Мраморного моря с учетом проливов Босфор и Дарданеллы. На ее основе проведен длительный прогностический эксперимент по формированию циркуляции в Мраморном море под влиянием потоков импульса, соли и тепла через проливы. Получены основные закономерности гидрологической структуры вод Мраморного моря, которые подтверждены доступными данными наблюдений. Численный эксперимент проводился при разрешении по горизонтали по

оси  $x$  – 3.66 км, по оси  $y$  – 2.5 км. По вертикали использовалось 18 горизонтов: 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 62.50, 75, 100, 150, 300, 500, 700, 900, 1100 м.

Скорости в Босфоре и Дарданеллах задавались постоянными во времени из условия 650 км<sup>3</sup>/год в верхнебосфорском течении, 350 км<sup>3</sup>/год в нижнебосфорском, 830 км<sup>3</sup>/год в верхнем течении и 530 км<sup>3</sup>/год в нижнем в Дарданеллах [3]. При задании температуры в верхнебосфорском течении учитывалась сезонная изменчивость. Она принимала следующие значения на каждый месяц, начиная с первого – 11.2, 7, 7.1, 10.8, 14.3, 18, 22.1, 23.5, 20.3, 16.2, 15.3, 12.2 °С. Соленость равнялась 21 ‰. В нижнем течении в Дарданеллах соленость менялась от 36 ‰ до 38.68 ‰, температура была равна 14.6° С.

В качестве начальных полей для  $T$  и  $S$  задавались климатические поля температуры и солености, построенные на основе данных измерений, имеющихся в базе данных МГИ НАН Украины для июля. Ниже 30 м все имеющиеся данные наблюдений на данном горизонте в этот сезон усреднялись, и начальная температура и соленость не зависели от горизонтальных координат. Уровень моря и горизонтальные скорости полагались равными нулю. Время интегрирования уравнений модели составило 10 000 суток.

Для анализа гидрофизических полей рассчитывались средняя по объему и на отдельных горизонтах кинетическая энергия, соленость и температура.

Поведение кинетической энергии свидетельствует о двух механизмах согласования гидрофизических полей. Быстрое приспособление, когда поле скорости приспосабливается под поле плотности, происходит приблизительно через 20 суток на верхних горизонтах и через 40 – 50 суток на нижних. Медленное согласование между полем плотности, скорости и давления, географическими особенностями моря и крайними условиями происходит на протяжении всего периода интегрирования.

В поведении средней по объему солености ( $S^m$ ) можно отметить следующие особенности. Выделяется начальный период – примерно около 3000 суток, после которого наблюдается периодический режим в поведении  $S^m$ . Вторая особенность – незначительная изменчивость в средней за год  $S^m$ .

В ее поведении имеют место сезонные колебания с амплитудой 0.0344 ‰. Время выхода средней солености на периодический режим зависит от глубины. С глубиной оно увеличивается. В верхнем слое 0–30 м время установления составляет приблизительно три года. Так как ниже в качестве начальных полей задавались постоянные температура и соленость по горизонтали, то время развития и установления поля солености увеличивается с 4 до 25 лет. Сезонный сигнал проникает до 100 м.

В поведении средней по объему температуры начальный период установления составляет примерно 1 год, и на протяжении всего периода интегрирования она имеет периодический характер. Зимой она достигает минимума, летом – максимума. Время выхода на периодический режим в слое 0–10 м не превышает год, что свидетельствует о согласовании начального поля и краевых условий. В слое 10–75 м от 2 до 3 лет, ниже – до 5 лет. Сезонный сигнал также наблюдается до 100 м.

3. Проведено изучение климатического поля течений на северо-западном шельфе Черного моря на основе ассимиляции климатических полей температуры и солености в численной гидродинамической модели с высоким разрешением по пространству (5 км). Построены с хорошей дискретностью во времени и пространстве поле течений, трехмерные поля температуры, солености и давления.

Три основных механизма формируют мезомасштабные особенности циркуляции на северо-западном шельфе Черного моря. Во-первых, это ветровой режим; вторым механизмом является приток пресной воды из крупных рек (Дунай, Днепр, Днестр), формирующий циркуляцию вод у берегов. Меандрирование Основного черноморского течения, проходящего вдоль свала глубин, генерирует мезомасштабные вихри и является третьей из главных особенностей поля течений рассматриваемого района.

Исследованы поведение и пространственная структура узких струйных течений, циклонических и антициклонических вихрей в северо-западной шельфовой части моря. Характерной особенностью динамики вод рассматриваемого района является наличие Севастопольского антициклона, который, изменяясь в масштабе и конфигурации, то приближается, то отдалается в тече-

ние года от берегов Крыма. Наименьшая вихревая активность в течение года в поверхностном слое моря (0–20 м) отмечена в июле – августе. Поле скоростей в это время имеет наиболее гладкий вид, наблюдается лишь небольшое циклоническое образование в районе устья Днестра и два мелко-масштабных вихря в Каркинитском заливе. Вдоль западного берега шельфовой зоны струйное течение на глубине 20 м наблюдается с октября по май. Оно берет начало в районе устья Дуная, следуя вверх к северному побережью и далее на восток в Каркинитский залив. На поверхности моря в это время преобладает юго-западное направление векторов скорости, что соответствует направлению ветра. В феврале-марте вихревая активность снижается, но уже в апреле, с началом поступления паводковых вод, интенсифицируются движения по всей рассматриваемой части моря. Образуется большой циклонический вихрь в центре шельфовой зоны. Вдоль северного берега и в Каркинитском заливе наблюдается цепь мелких вихрей. В июне поле скоростей еще более усложняет свой вид. Усиливается циклон в районе устья Днестра, появляются два вихря среднего масштаба к югу и юго-западу от устья Дуная, увеличивается мощность Севастопольского антициклона.

Результаты расчетов показали, что климатическое поле течений северо-западного шельфа Черного моря обладает сложной мезомасштабной структурой, включающей в себя вихревые образования и струйные течения различного происхождения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Численная консервативная модель бароклинных течений в океане. В кн.: "Численное моделирование климата Мирового океана". М., ОВМ, 1986. С.60–79.
2. Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартнев С.М. Введение в гидродинамику и теорию волн. – С-Пб.: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
3. Surku T., Besiktepe, Halil I., Sur, Emin Ozsoy at all The circulation and hydrography of the Marmara Sea // Prog. Oceanog. – 1994. – 34. – P.285–334.