

**И. П. Чубаренко, А. А. Палий**

**ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВЫХОЛАЖИВАНИЯ ВОД НАД ПРИБРЕЖНЫМ СКЛОНОМ:  
СРАВНЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО  
И НЕГИДРОСТАТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЙ**

*Обсуждаются структура и динамика полей течений и температуры воды в прибрежной зоне крупного бассейна, рожденных сезонными изменениями условий теплообмена на его поверхности. Показано, что структура полей воспроизводится обеими моделями адекватно, скорости течений различаются незначительно, но при этом гидростатическая модель дает более гладкое поле скоростей и заметно большие горизонтальные градиенты температуры.*

*This article addresses the structure and dynamics of current and temperature fields in the coastal zone of a large water body generated by seasonal variations of heat-exchange conditions at the water surface. Numerical solutions of three-dimensional hydrostatic and non-hydrostatic models MIKE3-FlowModel in shallow and deep parts of the basin are compared. It is shown that the structure of fields is reproduced adequately by both models and water currents are similar; however, the hydrostatic model produces a smoother current field and significantly larger horizontal temperature gradients.*



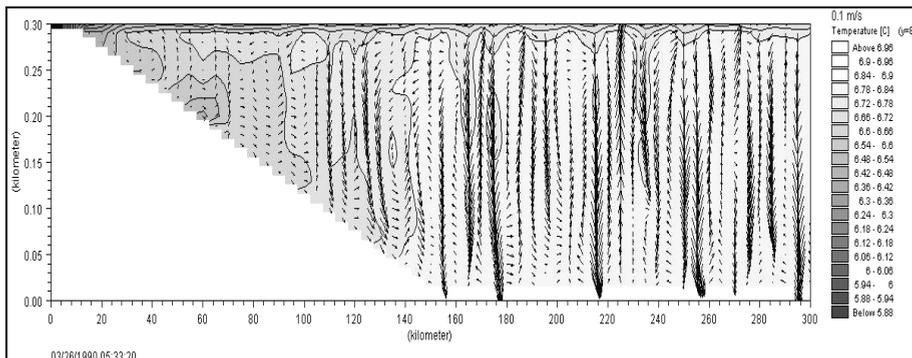
**Ключевые слова:** гидродинамика, моделирование, гидростатика, негидростатика, конвекция, подводный склон.

**Key words:** hydrodynamics, modelling, hydrostatics, non-hydrostatics, convection, submarine slope.

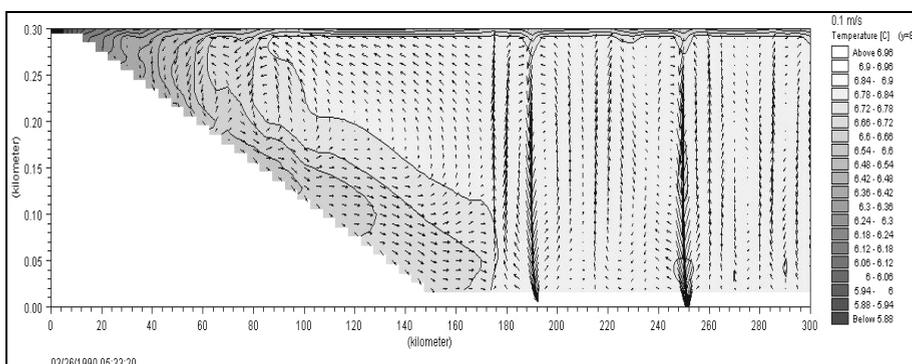
Опыт океанографического численного моделирования показывает, что современные модели хорошо воспроизводят процессы адвективного переноса, в то время как задачи конвекции требуют особых усилий даже в случае применения полных негидростатических моделей. В предлагаемой работе приводится сравнение полученных с помощью гидростатической и негидростатической трехмерных моделей MIKE3-Flow-Model Датского гидравлического института численных решений задачи о выхолаживании вод над прибрежным склоном [1]. Расчеты проводились по одним и тем же граничным и начальным условиям на сетке  $150 \times 30$  ячеек по горизонтали ( $5 \times 5$  км) и 30 слоев по вертикали (10 м) с шагом по времени 100 с в течение 1,5 лет модельного времени. Склон длиной 150 км (30 ячеек) с уклоном дна  $0,1^\circ$  воспроизводит масштабы шельфа Северного Каспия, где конвективное перемешивание в зимнее время достигает глубины 300 м и играет значительную роль в динамике вод всего бассейна. Начальное поле температуры принималось за однородное; турбулентный обмен моделировался в формулировке Смагоринского; трение о дно задавалось коэффициентом его шероховатости. Влияние вращения Земли не учитывалось.

Прибрежное выхолаживание приводит к образованию каскада охлаждающей воды, который стекает вдоль берегового склона в глубокую часть бассейна. В верхних и промежуточных слоях формируется направленное к берегу компенсационное течение. Общая картина течений нестационарна, и горизонтальный транспорт от / к берегу время от времени прерывается падающими с поверхности холодными вертикальными термиками. Для примера на рисунке 1 представлен вертикальный разрез полей температуры воды и течений в присклоновой области, полученных различными моделями в один и тот же момент времени.

Собственно процесс остывания с поверхности воспроизводится обеими моделями адекватно: ограниченная глубина воды на береговом склоне позволяет прибрежным водам реагировать на сезонные изменения теплопотока значительно быстрее, чем в открытой глубоководной части. Возникшие градиенты температуры и, соответственно, плотности порождают специфическую динамику вод, которая и отражена в решениях. В среднем у самого берега гидростатическая модель воспроизводит температуру воды на  $0,3^\circ\text{C}$  ниже, чем негидростатическая. В негидростатическом решении температура воды оказывается более высокой почти повсеместно, но в глубокой части разница составляет только около  $0,05^\circ\text{C}$ , т.е. решения близки. Общая структура поля температуры и процесс ее понижения со временем воспроизводятся обеими моделями сходным образом, различия заметнее в прибрежной зоне. В верхней части склона разница решений особенно велика — до  $0,45^\circ\text{C}$ , и повышена до  $0,1^\circ$  на его конце, сразу после перехода к глубокой части.



а



б

Рис. Изотермы (проведены через 0,06 °С) и векторы скорости течений негидростатического (а) и гидростатического (б) решений на вертикальном разрезе вдоль склона. Правая граница открыта

Установление картины течений, характерной для процесса выхолаживания над склоном, от начального состояния покоя происходит быстрее в гидростатической модели и составляет порядка 10–12 дней против 20–22 дней в негидростатической постановке. При этом последняя модель воспроизводит более изменчивое и тонко структурированное поле течений. Согласно гидростатическому приближению уравнений динамики жидкости, вертикальный градиент давления уравнивается силой плавучести; хотя жидкость и находится в движении, траектории жидких частиц очень близки к горизонтальным, в силу чего их вертикальные ускорения малы [2]. Поэтому, несмотря на то что максимальные значения вертикальных скоростей практически совпадают, интенсивность вертикальных движений выражена в негидростатическом решении заметно выше.

В гидростатическом варианте вдольсклоновое течение непрерывно, но имеет пульсирующий характер. Горизонтальные скорости в верхнем слое в прибрежной области полностью сглаживают конвективные ячейки. В негидростатическом варианте конвективные (крупномас-



штабные) ячейки хорошо выражены, но не открытого (как наблюдается в природных водоемах), а закрытого типа. В обоих решениях течения оказываются существенно переменными по величине и направлению.

В целом структура полей течений и температуры воды удовлетворительно воспроизводится обеими моделями: опускание вдоль склона более холодной и тяжелой воды из прибрежной зоны компенсируется притоком более теплой воды из глубокой части в поверхностном и промежуточном слоях.

Таким образом, горизонтальная конвекция, рождаемая выхолаживанием над прибрежным склоном, несет типичные черты конвективного процесса: характеристики движения изменчивы в пространстве и во времени, но при этом отчетливо проявляется тенденция к структурности потоков. В случае решения задачи конвекции с использованием гидростатической модели обнаруживается занижение температуры воды в верхней части склона, что приводит к большим значениям горизонтальных градиентов температуры. Последние, в свою очередь, причина более устойчивых и интенсивных горизонтальных течений. Структуры полей и течений, и температуры в обоих вариантах решения — имеют многие общие черты. Средние значения скоростей движений также воспроизводятся обеими моделями весьма сходным образом, что позволяет успешно их использовать для изучения вопросов сезонного горизонтального водообмена.

*Работа проводится при поддержке гранта РФФИ № 07-05-00850.*

### Список литературы

1. MIKE3 — User Guide. DHI Water & Environment. DHI Software 2005.
2. Holton J.R. An introduction to dynamic meteorology. 3rd ed. Academic Press, 1992.

### Об авторах

Ирина Петровна Чубаренко — канд. тех. наук, ведущий науч. сотр., Атлантической отделение Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Калининград.

E-mail: Irina\_chubarenko@mail.ru

Алёна Алексеевна Палий — асп., Калининградский государственный технический университет.

E-mail: tka@pisem.net

### About authors

Dr Irina Chubarenko, Leading Research Fellow, Atlantic Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad.

E-mail: Irina\_chubarenko@mail.ru

Alyona Paliy, PhD student, Kaliningrad State Technical University.

E-mail: tka@pisem.net