

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ОБСКОЙ ГУБЫ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

В.Ю. Чанцев<sup>1,2</sup>, Ю.П. Гудошников<sup>1</sup>, А.А. Скутин<sup>1</sup>, Д.А. Плешанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

## NUMERICAL MODELING OF THE OB BAY REGIME WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

V.Yu. Chantsev<sup>1,2</sup>, Yu.P. Gudoshnikov<sup>1</sup>, A.A. Skutin<sup>1</sup>, D.A. Pleshanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

*В работе дается общее описание модели Delft3D и рассматриваются результаты численного моделирования внутригодовой изменчивости отдельных параметров термо- и гидродинамического режима Обской губы на расчетной сетке с пространственным разрешением 50-100 м по горизонтали и 1-2 м по глубине.*

*The work provides a general description of the Delft3D model and discusses the results of numerical simulation of the intra-annual variability of individual parameters of the thermo- and hydrodynamic regime of the Ob bay on a computational grid with a spatial resolution of 50-100 m horizontally and 1-2 m depthly.*

Планомерное освоение арктического региона и района Обской губы в частности требует проведения массовых и продолжительных гидрометеорологических исследований с высоким пространственным разрешением. Климатические ограничения высоких широт не позволяют проводить продолжительные натурные наблюдения с необходимой детализацией. Для получения более полной информации о состоянии водной среды с таким разрешением необходимо использовать методы численного моделирования. Для численного моделирования в Обской губе требуется модель, функционирующая на пространственной сетке с разрешением до 10-100 м, а самые известные и распространенные океанские модели имеют ограничения в пространственном разрешении 1-3 км [1]. Высокая пространственная детализация определяется условиями гидротехнической деятельности в отдельных районах рассматриваемой акватории.

Моделирование ледового режима также требует высокой пространственной детализации, связанной с расчетом ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения и расчетом пространственного распределения физико-механических свойств морского льда.

В работе рассмотрены возможности численной модели Delft3D, адаптируемой к условиям Обской губы. Особенностью модельного комплекса Delft3D является то, что этот комплекс создавался как раз для условий прибрежных районов морей и эстуариев.

Модель Delft3D представляет модульный комплекс, позволяющий комбинировать структуру решаемой задачи. Комплекс содержит удобный интерфейс подготовки вычислительного процесса и визуализации результатов моделирования.

Областью применения модели Delft3D является расчет наиболее важных процессов и явлений, происходящих в водной среде: приливные и ветровые явления; градиентные и стоковые течения; цунами, наводнения и гидравлические скачки; солевые интрузии; термическая, соленосная и плотностная стратификация; распространение растворенного материала, нефтяных разливов и других загрязняющих веществ; морфологические изменения и перенос осадков; осушка и затопление берегов

Основные возможности Delft3D представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные расчетные модули Delft3D

Модуль	Описание
Delft3D-FLOW	Расчет многомерных (2D или 3D) гидродинамических нестационарных процессов: течений и переноса консервативных и неконсервативных трассеров.
Delft3D-WAVE	Моделирование эволюции случайных короткопериодных ветровых волн, основанное на волновой модели SWAN третьего поколения, базирующейся на решении дискретного уравнения баланса спектрального действия.
D-Water Quality	Моделирование качества воды и водных экосистем. Моделируемые химические соединения и процессы, выбираются из библиотеки процессов.
D-Waq PART	Лагранжев расчет распространения пассивных частиц примесей. Треки записываются в трех измерениях, в результате чего динамическое распределение концентрации примесей получается путем вычисления массы частиц в ячейках сетки.
Delft3D-ECO	Моделирование эвтрофикации с формированием осадочного слоя.
Delft3D-SED	Расчет переноса когезивных и некогезивных осадков.
ICE	Моделирование эволюции толщины, сплоченности, торошения и наслоения морского льда. Расчет формирования снежного покрова на льду и его учет в термодинамических процессах нарастания и таяния льда

Модуль Delft3D-FLOW является основным в модели Delft3D. На его основе производится расчет во всех остальных модулях комплекса. Расчет течений в модуле Delft3D-FLOW может выполняться как на основе уравнений мелкой воды (2D), так и с учетом бароклинной моды (3D). Особенностью используемой модели является возможность подключения негидростатического подхода при расчете течений, что позволяет описывать более точно мелкомасштабные процессы плотностной неустойчивости, направленные не только вниз, но и к поверхности моря.

Для этого осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье-Стокса будет быть записано как:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \varepsilon_{ijk} 2\Omega_j u_k = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} g \delta_{i3}, \quad (1)$$

где  $\delta_{ij}$  - дельта Кронекера,  $\varepsilon_{ijk}$  - символ перестановки,  $\Omega_j$  - планетарная завихренность, а  $\tau_{ij}$  - турбулентные напряжения. Давление  $p$  разбивается на гидростатическую ( $\rho g z$ ) и гидродинамическую ( $q$ ) часть:

$$p = p_{atm} + g \int_z^\zeta \rho dz + q \quad (2)$$

Уравнение неразрывности можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

Тогда, интегрируя уравнение неразрывности по глубине и применяя кинематическое граничное условие, имеем

$$\frac{D\zeta}{Dt} \equiv \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = w \quad (4)$$

или

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^\zeta u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^\zeta v dz = 0 \quad (5)$$

где  $\zeta$  – превышение уровня моря, а  $d$  – глубина места.

Гидродинамическое давление рассчитывается с использованием метода коррекции давления, аналогично методу, представленному Касулли (Casulli) [2]. Баротропный градиент давления вычисляется неявно, чтобы избежать ограничений временного шага из-за условий устойчивости. Для вычислительной эффективности остальная часть терминов обрабатывается явно. При

негидростатическом подходе коррекция давления решается с помощью метода сопряженного градиента. Этот метод осуществляется путем генерации векторных последовательных итераций.

Модуль ICE был подключен к модельному комплексу Delft3D в последнюю очередь. Термодинамический блок модуля ICE базируется на простых параметризациях процесса нарастания и таяния льда и формированием снежного покрова, предложенных Семтнером (Semtner) [3] и доработанных Вангом (Wang) [4]. Динамический блок модуля ICE, предназначенный для расчета концентрации льда и его механического разрушения, представляет собой последнюю модификацию известной ледовой модели LIM (Louvain-la-Neuve sea Ice Model) [5], основанной на упруго-вязко-пластичной модели динамики морского льда [6].

Подготовка исходных данных для осуществления моделирования процессов в водной среде, а также анализ и визуализация результатов моделирования проводился с помощью дополнительных процедур, представленных в комплексе Delft3D.

#### Проведение и проверка численных расчетов.

При адаптации модели Delft3D проводился расчет годовой эволюции гидродинамического и ледового режима Обской губы. Для этого была построена расчетная сетка с пространственным разрешением от 4 км в Карском море и до 50 м в Обской губе.

Для расчета термо- и гидродинамических процессов у поверхности воды в узлах расчетной сетки задавалась пространственно-временная изменчивость атмосферных форсингов в период 2015-2016 годов. В качестве начальных условий было выбрано среднеклиматическое распределение температуры и солености в августе в Карском море и Обской губе. Динамические начальные условия задавались нулевыми. Разгон гидродинамического режима осуществлялся, в основном, приливо-отливными колебаниями уровня.

Валидация результатов численных расчетов динамики уровня моря под действием периодических и неперидических вынуждающих сил проводилась путем сравнения с данными наблюдений уровня моря и вертикального распределения течения, полученными с донной автоматической станции (АДС). Для оценки точности численного расчета динамических характеристик был выбран летний период 2016 г.

Фаза рассчитанных колебаний уровня совпадает с фазой наблюдаемых. Ошибка численного расчета проявляется только в амплитуде колебаний. За весь период расчета максимальная ошибка расчета уровня моря не превышала 30 см. При этом средняя погрешность расчета укладывалась в 2.4 см., что составляло 12.6 % от среднеквадратического отклонения (СКО) в наблюдаемых колебаниях уровня моря.

В колебаниях скорости и направления течения хорошо прослеживается влияние полусуточных приливных осцилляций уровня. При этом хорошо прослеживаются и неперидические возмущения в параметрах течения. Что касается погрешности расчета направления течения, то ее средняя величина составляет  $30.9^\circ$  или 11.4 % от СКО измеренного направления течения. Возникающие отклонения рассчитанных параметров течений от измеренных величин в значительной степени зависят от точности задания донной топографии.

На рисунке 1 приведена годовая эволюция толщины льда в районе мыса Каменный Обской губы в 2015-2016 г. Начало ледообразования и время очистки акватории ото льда соответствуют имеющимся наблюдениям. Характер динамики нарастания льда по модельным расчетам несколько превышает наблюдаемую динамику, что хорошо видно из рисунка.

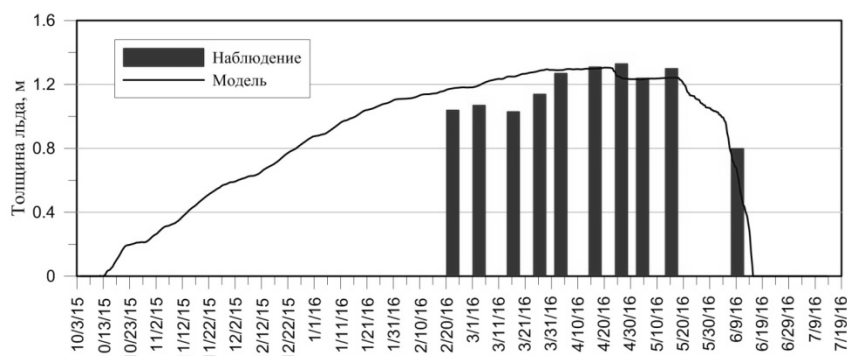


Рис. 1. Годовая эволюция и опорные измерения толщины льда в районе мыса Каменный

Ошибка расчета толщины морского льда до 10 см является приемлемой для моделирования ледовых условий высоких широт, тем более что максимальные погрешности в расчете толщины льда наблюдаются только при значительных толщинах. Видно, что таяние льда в модельном расчете происходит несколько быстрее, чем по натурным наблюдениям. Это также связано с отсутствием снежного покрова. Адаптируемый к северным условиям Обской губы модельный комплекс Delft3D в приведенном анализе численного эксперимента эволюции толщины льда в районе мыса Каменный показал адекватное воспроизведение динамики мощности ледяного покрова.

Сравнение эволюции выбранных параметров с данными наблюдений демонстрирует положительные возможности модельного комплекса Delft3D для ее использования на прибрежных морских акваториях высоких широт с высоким пространственным разрешением. Наибольшие значения погрешностей расчета в основном связаны с качеством исходных данных, использованных в модели.

### **Литература**

1. Вольцингер Н.Е., Андросов А.А., Клеванный К.А., Сафрай А.С. Океанологические модели негидростатической динамики. Обзор // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. Т. 11. № 1. 2018. С. 3-20.
2. Casulli V. A semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic, free surface flows // *International Journal Numerical Methods In Fluids* 30. 1999. P. 425-440.
3. Semtner A.J. A Model for the Thermodynamic Growth of Sea Ice in Numerical Investigations of Climate // *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 6. 1976. P. 379-389
4. Wang J., Qinzhen Liu, Meibing Jin and et. A Coupled Ice-Ocean Model in the Pan-Arctic and North Atlantic Ocean: Simulation of Seasonal Cycles // *Journal of Oceanography*. Vol. 61. 2005. P. 213-233
5. Vancoppenolle M., Bouillon S., Fichefet T., and et. The Louvain-la-Neuve sea Ice Model // *Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace*. No 31. 2012. 89 p.
6. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An Elastic-Viscous-Plastic Model for Sea Ice Dynamics // *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 27. 1997. P. 1849-1867