

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕКОТОРЫХ ГУБАХ КАРЕЛЬСКОГО БЕРЕГА КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА

Несмотря на то, что Белое море - одна из наиболее изученных акваторий в России, количество исследований, посвященных распределению планктонной фауны мелкомасштабных эстуарных акваторий, гидрологический режим которых имеет выраженную приливную составляющую, невелико. Большая часть исследований такого рода проведена в бассейнах рек Северной Америки. Исследования поведения эстуарного зоопланктона показали, что помимо суточных миграций, связанных с изменением освещенности и давлением со стороны хищников, все группы зоопланктона, населяющие приливные эстуарии, осуществляют миграции, ориентированные на прилив. Это делает задачу изучения закономерностей распределения планктонных организмов в условиях значительной пространственно-временной изменчивости гидрологического режима еще более сложной. Отсутствие работ, посвященных проблеме распределения зоопланктона в приливных беломорских эстуариях, связано с недостаточной изученностью гидродинамического режима этих районов.

Основным методом решения различных прикладных задач гидродинамики прибрежной зоны и внутренних водоемов в настоящее время является математическое моделирование. При решении широкого класса таких задач используются трехмерные уравнения движения в гидростатическом или длинноволновом приближении и следующие из них уравнения мелкой воды. В круг явлений, которые описывают эти уравнения, входят дрейфовые течения, штормовые нагоны, течения в реках, приливы, цунами, сейши и т.д.

Характерной особенностью беломорских мелководных губ является впадение в их куттовую часть рек или ручьев, создающих приток пресной воды. Вследствие этого наблюдается устойчивая стратификация вод с наличием достаточно узкого слоя скачка, что позволяет рассматривать динамику данных акваторий как динамику двухслойной жидкости. Верхний слой испытывает воздействие атмосферных процессов. Нижний слой испытывает возмущения, формирующиеся под действием приливных волн. При этом предполагается, что губа не имеет в себе узлов. Таким образом можно задавать приливную силу, как изменение уровня на входе в губу.

Цель настоящей работы - расчет гидродинамического режима губ Чупа, Кереть и Никольская Кандалакшского залива Белого моря с помощью интегрированной моделирующей программной системы «CARDINAL» (Coastal Area Dynamics Investigation Algorithm) в трехмерном приближении.

Одной из трудностей, которая часто препятствует применению математического моделирования при решении практических задач, является сложная конфигурация расчетной области. Широко используемый подход к численному моделированию гидродинамических задач состоит в аппроксимации границы отрезками параллельными декартовым координатам. Недостатком такого подхода является искажение решения в граничной зоне, т.е. там, где обычно требуется максимальная точность. При такой апп-

роксимации границы условие равенства нулю нормальной составляющей скорости интерпретируется в виде равенства нулю вектора скорости.

Одним из методов решения задач в областях сложной конфигурации является метод конечных элементов. Другой подход состоит в отображении физической области на каноническую и численном решении модифицированных уравнений в канонической области конечно-разностными методами. Точность решения при этом повышается. Показано, что переход к криволинейным координатам целесообразен, в то время как ошибки, возникающие при кусочно-линейной аппроксимации границы, не устраняются при учащении шага сетки. Отображение криволинейной области на прямоугольную может быть выполнено различными способами, например, решением эллиптических уравнений с заданными значениями координат на границах области. Исходные уравнения трансформируются к криволинейным координатам и затем численно интегрируются в канонической области.

Для моделирования длинноволновой динамики исследуемых акваторий использовались уравнения мелкой воды:

$$U_t + gH \zeta_x = - \left( \frac{U^2}{H} \right)_x - \left( \frac{UV}{H} \right)_y + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} w_{(x)} |\vec{W}| - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + f_b \frac{U |\vec{V}|}{H^2} + fV + K \Delta U, \quad (1)$$

$$V_t + gH \zeta_y = - \left( \frac{UV}{H} \right)_x - \left( \frac{V^2}{H} \right)_y + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} w_{(y)} |\vec{W}| - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - f_b \frac{V |\vec{V}|}{H^2} - fU + K \Delta V, \quad (2)$$

$$\zeta_t + U_x + V_y = 0, \quad (3)$$

где  $U, V$  – составляющие вектора полного  $\vec{V}(x, y, t)$  потока в направлениях  $x$  (восток) и  $y$  (север);  $g$  – ускорение силы тяжести;  $H = h + \zeta$ , – полная глубина слоя;  $h(x, y)$  – глубина в невозмущенном состоянии;  $\zeta(x, y, t)$  – отклонение уровня свободной поверхности от среднего положения;  $C_D(W)$  – коэффициент ветрового трения;  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $\rho_0$  – плотность воды;  $W(x, y, t)$  – вектор скорости приземного ветра с компонентами  $w_{(x)}$  и  $w_{(y)}$ ;  $P_a(x, y, t)$  – приземное атмосферное давление,  $f_b$  – коэффициент придонного трения;  $f(y)$  – параметр Кориолиса;  $K$  – коэффициент горизонтального турбулентного обмена;  $\Delta$  – плоский лапласиан.

При трехмерном приближении используются уравнения мелкой воды, интегрируемые в пределах вертикальных слоев, количество которых и толщина определяются априорно. После преобразования к криволинейным координатам [4] исходные уравнения (1) - (3) приводятся к виду

$$\begin{aligned}
& P_t + \frac{gH}{J}(g_{22}\zeta_\xi - g_{12}\zeta_\eta) = \\
& = -\frac{1}{J} \left\{ \left( \frac{P^2}{H} \right)_\xi + \left( \frac{PQ}{H} \right)_\eta + \frac{y_\eta Q + y_\xi P}{JH} (x_{\xi\eta} P + x_{\eta\eta} Q) - \frac{x_\xi P + x_\eta Q}{JH} (y_{\xi\eta} P + y_{\eta\eta} Q) \right\} + \quad (4) \\
& + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} (y_\eta w(x) - x_\eta w(y)) |W| - \frac{H}{\rho_0} \left( y_\eta \frac{\partial P_a}{\partial x} - x_\eta \frac{\partial P_a}{\partial y} \right) - f_b \frac{P|V|}{H^2} + \\
& + \frac{f}{J}(g_{22}Q + g_{12}P) + \frac{K}{J^2} [g_{11}P_{\eta\eta} + g_{22}P_{\xi\xi} - 2g_{12}P_{\eta\xi}],
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q_t + \frac{gH}{J}(g_{11}\zeta_\eta - g_{12}\zeta_\xi) = \\
& = -\frac{1}{J} \left\{ \left( \frac{Q^2}{H} \right)_\eta + \left( \frac{PQ}{H} \right)_\xi + \frac{x_\xi P + x_\eta Q}{JH} (y_{\xi\eta} Q + y_{\xi\xi} P) - \frac{y_\eta Q + y_\xi P}{JH} (x_{\xi\eta} Q + x_{\xi\xi} P) \right\} + \quad (5) \\
& + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} (x_\xi w(y) - y_\xi w(x)) |W| - \frac{H}{\rho_0} \left( x_\xi \frac{\partial P_a}{\partial y} - y_\xi \frac{\partial P_a}{\partial x} \right) - f_b \frac{Q|V|}{H^2} - \\
& - \frac{f}{J}(g_{11}P + g_{12}Q) + \frac{K}{J^2} [g_{11}Q_{\eta\eta} + g_{22}Q_{\xi\xi} - 2g_{12}Q_{\eta\xi}],
\end{aligned}$$

$$\zeta_t + \frac{1}{J}(P_\xi + Q_\eta) = 0, \quad (6)$$

где  $P = y_\eta U - x_\eta V$ ,  $Q = x_\xi V - y_\xi U$  – умноженные на якобиан контравариантные составляющие полного потока, характеризующие расходы воды;  $g_{11} = x_\xi^2 + y_\xi^2$ ,  $g_{22} = x_\eta^2 + y_\eta^2$ ,

$g_{12} = x_\eta x_\xi + y_\eta y_\xi$  – компоненты ковариантного метрического тензора, характеризующие

квадрат сжатия координат вдоль соответствующего направления (компоненты с повторяющимся индексом), и косинус угла между координатными линиями (компонент с разными индексами).

Уравнения (4)-(6) решаются полуявным конечно-разностным методом, в котором гравитационная мода и придонное трение аппроксимированы неявно, а адвективная мода, а также сила Кориолиса и горизонтальный турбулентный обмен аппроксимированы явно. Используется полностью разнесенная С-сетка Мезингера-Аракавы, центрально-разностная аппроксимация пространственных производных и аппроксимация Кранка-Николсона по времени. Граница расчетной области проходит по P, Q-точкам. Для решения уравнений применяется метод расщепления второго порядка точности.

При реализации модели динамического режима губ Чупа, Кереть и Никольская шаг по пространству составлял 150–200 м, разрешение по вертикали – 10 слоев. Шаг по времени (8 с) определялся соотношением Куранта-Фридриха-Леви. Глубины в расчетной области колебались от 5 до 173 м, при этом площадь мелководной зоны (менее 20 м) составляла около 50-60%.

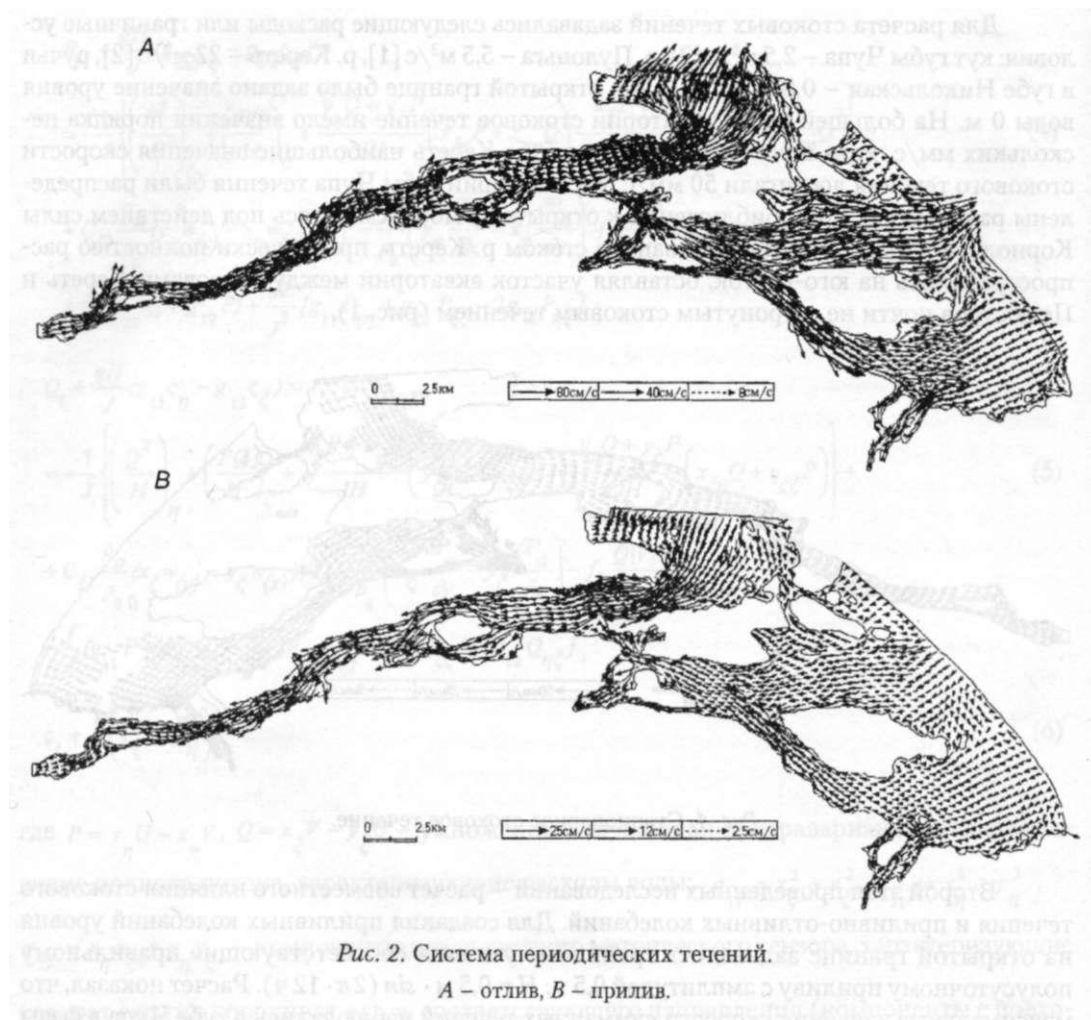
Для расчета стоковых течений задавались следующие расходы или граничные условия: кут губы Чупа -  $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$  [3], р. Пулоньга -  $5,5 \text{ м}^3/\text{с}$  [1], р. Кереть -  $22 \text{ м}^3/\text{с}$  [2], ручьи в губе Никольская -  $0,8$  и  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ . На открытой границе было задано значение уровня воды  $0 \text{ м}$ . На большей части акватории стоковое течение имело значения порядка нескольких мм/с, хотя в устье р. Кереть и в губе Кереть наибольшие значения скорости стокового течения достигали  $50 \text{ мм}/\text{с}$ . На акватории губы Чупа течения были распределены равномерно, при приближении к открытому морю смещаясь под действием силы Кориолиса вправо. Течение, вызванное стоком р. Кереть, практически полностью распространялось на юго-восток, оставляя участок акватории между островами Кереть и Пезостров почти не затронутым стоковым течением (рис. 1).



Второй этап проведенных исследований - расчет совместного влияния стокового течения и приливно-отливных колебаний. Для создания приливных колебаний уровня на открытой границе задавались граничные условия соответствующие правильному полусуточному приливу с амплитудой  $0,5 \text{ м}$ :  $H = 0,5 \text{ м} \cdot \sin(2\pi \cdot 12 \text{ ч})$ . Расчет показал, что максимальные значения скорости суммарных течений наблюдались в губе Чупа в фазы смены вод (до  $40 \text{ см}/\text{с}$  на приливе и до  $25 \text{ см}/\text{с}$  на отливе). В открытой части акватории и в губах Кереть и Никольская модуль скорости течения за весь приливно-отливный период колебался от  $5$  до  $12 \text{ см}/\text{с}$ .

По сравнению со стоковым течением, формирующимся на данной акватории при задании многолетнего среднегодового расхода рек, суммарное приливно-отливное и стоковое течение было в  $10$  и более раз интенсивней. Лишь в губе Кереть скорости суммарного течения и чистого стокового течения были сопоставимы, что, вероятно, и сказывалось на увеличении суммарного течения в фазу отлива в данном районе до  $15 \text{ см}/\text{с}$  (рис. 2).

В целом можно признать, что полученные схемы циркуляции, а также оценки скоростей периодических течений близки к натурным данным и могут являться основой для дальнейших расчетов переноса пассивных примесей (в том числе организмов зоопланктона) по акваториям изучаемых губ.



### Summary

*Primakov I.M., Morozov E.A.* Modelling hydrodynamical processes in some bays of the Karelian coast of the Kandalaksha gulf.

The results of modelling hydrodynamics in three tidal bays of Kandalaksha gulf of the White Sea are summed up. Due to the presence on the researched water areas well-defined pycnocline, for calculations it is possible to use the theory of small-sized water for a liquid with two layers. The received hydrodynamical model can be used for the further calculations of transference of passive impurity (including zooplankton organisms) on water areas of investigated bays.

### Литература

1. Берсонов С.А. Водно-энергетический кадастр Карельской АССР // Кадастр потенциальных запасов водной энергии. М.; Л., 1960.
2. Гидрологический ежегодник. 1970 г. Т. 0.

Бассейн Белого моря. Вып. 1. Бассейны рек между бассейнами рек Нивы и Онеги / Под ред. И. А. Сазоновой, Л., 1971. 3. Савоськин *Ю.М.* Основные черты гидролого-гидрохимического режима губы Чупа Белого моря: Отчет о гидрол. работах в губе Чупа Белого моря за 1957-1967 гг. Фонды Зоологического института АН СССР (Беломорская биостанция). 1969. 4. Klevanny *K.A.*, *Matveev G.V.*, *Voltzinger N.E.* Integrated modeling system for coastal area dynamics // Intern. J. Numerical Methods in Fluids. 1994. Vol. 19. N 3. P. 181-206.

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2006 г.