

УДК 551.465.4(261.246)

*Н.Х. Динь*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИДОННЫХ СОЛЕНЫХ ВОД В БОРНХОЛЬМСКОМ БАСЕЙНЕ

Российский государственный гидрометеорологический университет,  
huyspb@gmail.com

*Dinh Ngoc Huy*

## MODELING OF BOTTOM SALINITY WATER SPREADING IN THE BORNHOLM BASIN

В статье представлена нестационарная трехмерная гидростатическая модель распространения придонных соленых вод в Борнхольмский бассейн. Обсуждаются полученные с помощью модели результаты расчетов. Показана непротиворечивость результатов расчетов с доступными данными наблюдений.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, придонные соленые воды, Борнхольмский бассейн.

Presented not stationary three-dimensional hydrostatic model of bottom salty water spreading into the Bornholm Basin. It is discussed the calculations results of bottom water spreading in the Bornholm Basin after its inflow through the Bornholm Strait. It is shown the consistency of the calculations with the available observational data.

**Keywords:** mathematical modeling, near-bottom water salinity, Bornholm Basin.

### Введение

Распространение североморских вод в Борнхольмском бассейне является одним из звеньев в цепи серии котловин, которые североморская вода преодолевает на пути к центральной части Балтийского моря. В котловинах происходит значительная трансформация придонной соленой воды и ее распределение. От степени распределения североморской воды зависит ее поведение в центральных районах Балтики. В частности, при сохранении высоких значений солености североморская вода способна обеспечить обновление глубинных вод и насыщение котловин кислородом. В противном случае она распространяется в промежуточных горизонтах, не имея возможности обеспечить вентиляцию вод в глубоководных участках моря [3, 4, 6]. Несмотря на важность процессов трансформации североморской воды в котловинах моря до настоящего времени отсутствуют надежные методы их расчетов [1, 2]. В работе представлен опыт использования гидростатической модели для моделирования данного процесса.

### Основные уравнения

Для расчетов затока и распространения придонной соленой воды использовалась нестационарная трехмерная модель. Для расчета возмущения уровня

свободной поверхности используются осредненные по глубине уравнения движения и неразрывности.

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} - fv_m = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0 H} \int_0^H \left( \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \right) dz - \frac{c \rho_0 \sqrt{(u_m^2 + v_m^2)}}{H} u_m + k_l \left( \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial^2 y} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_m}{\partial t} + fu_m = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0 H} \int_0^H \left( \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \right) dz - \frac{c \rho_0 \sqrt{(u_m^2 + v_m^2)}}{H} v_m + k_l \left( \frac{\partial^2 v_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial^2 y} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial (u_m H)}{\partial x} + \frac{\partial (v_m H)}{\partial y} = -\frac{\partial \zeta}{\partial t}. \quad (3)$$

Трехмерные поля составляющих скоростей течений рассчитываются из трехмерных нестационарных гидростатических уравнений движения и уравнения неразрывности.

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_0^z \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) dz + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_0^z \left( \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) dz + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial v}{\partial z} \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

С помощью уравнения переноса соли рассчитывается трехмерное поле солёности

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial s}{\partial z} \right). \quad (7)$$

В используемом уравнении состояния учитывается лишь влияние солёности

$$\rho = F(s), \quad (8)$$

где  $u_m, v_m$  – осредненные по глубине моря составляющие скоростей течений;  $\zeta$  – возмущение уровня моря;  $H$  – глубина моря;  $\rho, \rho_0$  – плотность и стандартная плотность воды соответственно;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $f$  – параметр Кориолиса;  $u, v, w$  – составляющие скоростей течений по осям  $x, y$  и  $z$  соответственно;  $s$  – солёность воды;  $k_z, k_l$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентных вязкости и диффузии;  $c$  – коэффициент придонного трения.

При решении уравнений (1)–(3) в качестве граничных условий для полного потока на твердых и жидких границах задавалось условие непротекания. Таким образом, пренебрегалось баротропными переносами через жидкие границы. Исследование влияния данного фактора на перенос придонной солёной воды предполагалось выполнить в дальнейшем. Для горизонтальных составляющих

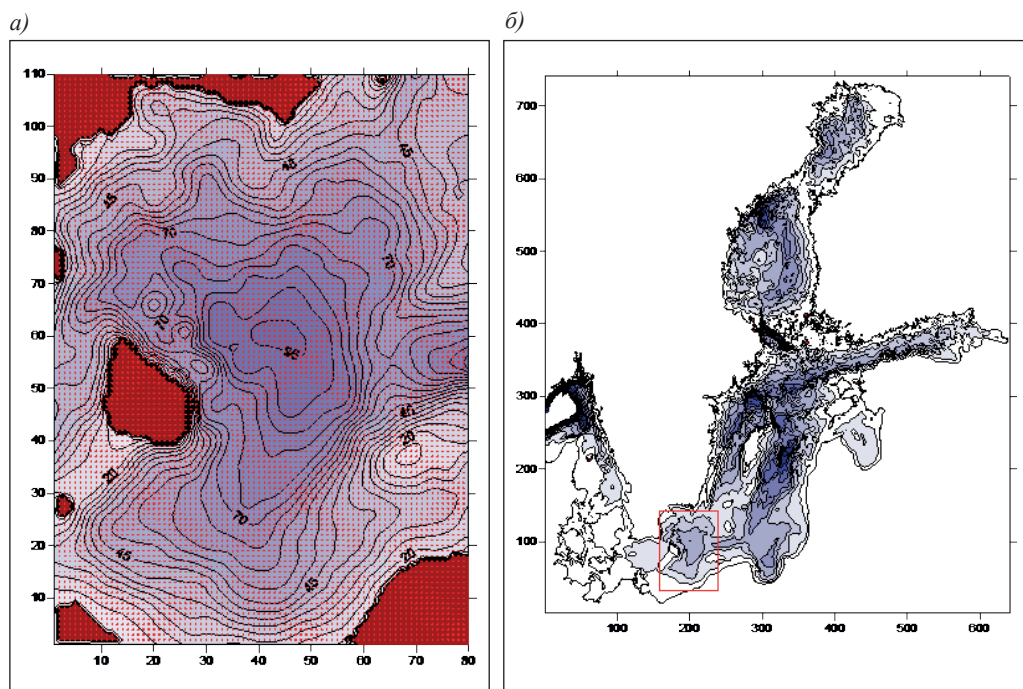


Рис. 1. Расчетная область (а) и ее расположение (б)

скоростей течений у дна использовалось условие прилипания, на поверхности моря задавалось отсутствие касательного напряжения трения ветра. На жидкой границе, соответствующей положению Борнхольмского пролива на горизонтах в пределах придонного слоя толщиной 20 м, задавалось распределение солёности, равное 20 ‰. Выше солёность принималась равной 15 ‰. Для остальной части боковой границы использовалось условие равенства нулю производной от солёности по нормали к боковому контуру. В качестве начальных условий задавались нулевое значение возмущения уровня моря и осредненных по глубине составляющих скоростей течений. Начальная солёность задавалась равной 15 ‰. Задача решалась на прямоугольной сеточной области размером по горизонтали 110×80 расчетных узлов и 40 узлов по вертикали (рис. 1). Шаг по горизонтали составлял 1,8 км, по вертикали – 1/39 от глубины моря. Использовалась процедура «спрямления дна», т. е. вертикальная координата  $z$  заменялась на координату, связанную с глубиной дна.

### Результаты расчетов

Рассчитывался процесс распространения поступающей из Борнхольмского пролива придонной солёной воды на период 200 суток. По результатам расчетов придонная солёная вода распространяется вдоль Борнхольмского пролива в виде узкого потока, концентрируясь у правого по направлению движения склона дна. Скорость течения в потоке меняется в пределах от 10 до 20  $\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$ . Толщина

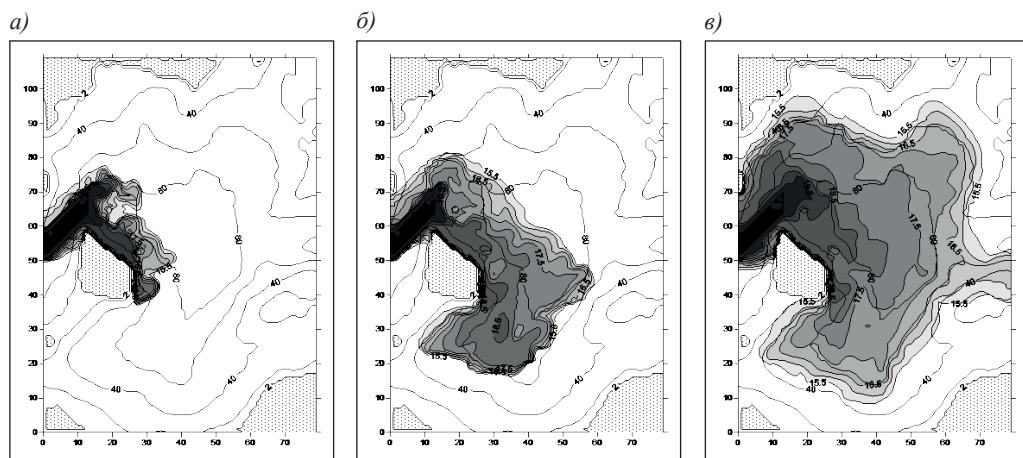


Рис. 2. Распределение солёности придонной воды, рассчитанные на 20 (а), 50 (б) и 200 (в) суток от начала расчетов (распределение солёности (‰) окрашено, распределение глубины (м) представлено изолиниями, суша выделена точками)

придонного слоя составляет около 10 м. На участке прохождения пролива солёность, а также ширина потока меняются слабо (рис. 2, а). После выхода из пролива поток поворачивает вправо и движется вдоль изобат, огибая с восточной стороны о. Борнхольм. Из-за большой нерегулярности глубин на данном участке, кроме основной струи, направленной преимущественно вдоль изобат, выделяются более слабые ответвления от основного потока, направленные в сторону увеличения глубин. Это приводит к увеличению ширины потока, а также к заметному уменьшению придонной солёности воды, которая уменьшается от 20 до 16 ‰. С течением времени, кроме основного движения вдоль изобат, все в большей степени начинает проявляться перенос вдоль наклона дна. В результате на 50-е сутки поток существенно расширяется в сторону максимальных глубин (рис. 2, б). Отмечается увеличение ширины потока в направлении его распространения. Из-за уменьшения солёности и наклона дна отмечается уменьшение скорости переноса придонной воды. На 200-е сутки придонная вода заполняет основную площадь глубоководной части Борнхольмской котловины. Сформировавшиеся придонные бароклинные течения имеют циклонический характер. Величина скоростей течений зависит от солёности придонной воды и наклона дна и ограничивается  $20 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ . Из-за наклона изопикн в сторону наибольших глубин формируется экмановский перенос солёных вод к центру котловины и постепенное увеличение толщины придонного слоя солёной воды.

Для оценки достоверности результатов расчетов проведено их сравнение с данными изменения содержания кислорода, происходящее в придонном слое в процессе заполнения Борнхольма североморской богатой кислородом придонной водой, происходящее в январе 2003 г. [5] (рис. 3). Из рис. 3 видно, что происходит повышение содержания кислорода на участке, расположенном непосредственно к востоку от о. Борнхольм. Это говорит о том, что придонная вода

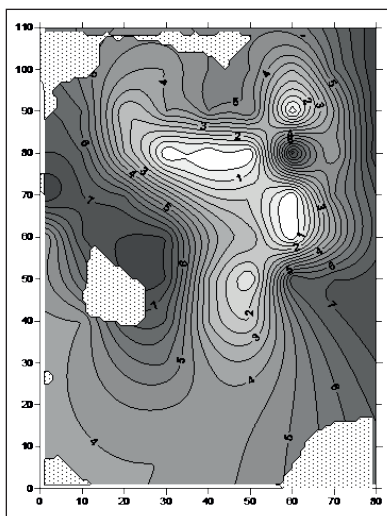


Рис. 3. Распределение содержания растворенного кислорода (мл/л) у дна в период затoka в Борнхольмский бассейн в анваре 2003 г.

при выходе из пролива вначале перемещается в виде относительно узкого потока вдоль восточной ганицы о. Борнхольм, что соответствует полученным нами результатам, представленным на рис. 2, а.

### Заключение

Представленная модель распространения и трансформации придонных соленых вод в Борнхольмском бассейне воспроизводит основные особенности моделируемого процесса. Доступные натурные данные не противоречат результатам расчетов.

### Литература

1. Владимирова О.М., Лукьянов С.В., Подрезова Н.А., Царев В.А. Особенности распространения придонных вод в центральной части Балтийского моря // Учен. зап. РГГМУ, 2014. № 35. – С. 31–41.
2. Царев В.А. Теория и расчеты распространения придонных вод в море. – СПб.: РГГМУ, 2001. – 60 с.
3. Feistel R., Nausch G., Matth W., Hagen E. Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring // Oceanologia, 2003. 45 (4), 2003. – P. 623–642.
4. Kouts T., Omstedt A. Deepwater exchange in the Baltic proper // Tellus. 1993. V. 45A. – P. 311–324.
5. Mohrholz V., Dutz J., Kraus G., The impacts of exceptionally warm summer inflow events on the environmental conditions in the Bornholm Basin, J. Marine Syst., 2006. 60, 285–301.
6. Omstedt A. Modelling the Baltic Sea as thirteen sub-basines with vertical resolution // Tellus. 1990. V. 42A. – P. 286–301.