

УДК 551.465.153(261.46.07)

*Н.Х. Динь*

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ БАРОТРОПНЫХ ТЕЧЕНИЙ В БОРНХОЛЬМСКОМ БАСЕЙНЕ ПРИ ЗАТОКЕ ЧЕРЕЗ ПРОЛИВЫ

Российский государственный гидрометеорологический университет,  
huyspb@gmail.com

*Ngoc Huy Dinh*

## FEATURES OF BAROTROPIC FLOWS FORMATION IN THE BORNHOLM BASIN AT INFLOW THROUGH THE STRAITS

В статье рассмотрен механизм формирования баротропной циркуляции в Борнхольмском бассейне в период затока североморских вод с помощью численного моделирования. Показано, что формирующаяся стоковая баротропная циркуляция, обусловленная меняющимся с периодом 5 и более суток расходом воды, на жидких границах имеет квазиустойчивый характер. Распределение баротропных течений и возмущения уровня в значительной степени определяются формированием топографической завихренности, возникающей при изменении глубины в направлении потока воды. Баротропные течения играют важную роль при переносе соленых вод в западную часть Балтийского моря при затоках через Датские проливы.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, Борнхольмский бассейн, баротропная циркуляция, низкочастотные колебания уровня, топографическая завихренность.

The mechanism of barotropic circulation formation in the Bornholm Basin caused by the North sea water inflow is considered by numerical simulation. Distributions of barotropic flows and sea level caused by inflow of water through the western border have been calculated. The calculations were run with real bottom depth and with constant depth, equal to its average value. By subtracting the distribution of sea level, obtained with setting the constant depth from relevant results obtained with the real bottom topography distribution of sea level perturbation caused by influence of bottom topography has been received. Barotropic currents play an important role in the transport of saline waters to the western part of the Baltic Sea during inflows through the Danish straits.

**Keywords:** mathematical modeling, Bornholm Basin, barotropic circulation, low frequency fluctuations of the sea level, topographic vorticity.

### Введение

Поступление североморской воды в Балтийское море играет важную роль в формировании его различных характеристик, включая обновление глубинных

вод в расположенных в центральной части моря глубоководных котловинах и насыщение их кислородом (предотвращении гипоксии), обновление промежуточных глубинных вод, формирование вертикальной плотностной стратификации вод и протекание осенне-зимней конвекции, траекторию и интенсивность потоков соли и другие. При движении к центральной части Балтийского моря североморские соленые воды проходят относительно мелководные и небольшие котловины. При этом происходит взаимодействие североморских вод с водой котловин, в результате чего происходит значительное изменение их солености, температуры и объема [2, 3, 4, 11]. Поведение североморских вод в центральной части Балтийского моря зависит от степени их трансформации, которая происходит при прохождении котловин. Борнхольмский бассейн является второй после Арконской мелководной котловиной, где совершается трансформация поступающих в него североморских вод. Это определяет интерес к изучению механизмов и особенностей распространения североморских вод в Борнхольмском бассейне.

Результаты предыдущих исследований показали, что поступающая в Арконский бассейн североморская вода распространяется в нем под влиянием баротропных и бароклинических течений [1, 7]. При этом на участках, где отмечается усиление баротропных течений, в частности в окрестности проливов, роль баротропной составляющей течений оказывается преобладающей. Представляет интерес исследование особенностей распространения североморских вод и в Борнхольмском бассейне, а также роли баротропных и бароклинических течений. Первым шагом к проведению таких исследований является изучение особенностей формирования баротропных течений в Борнхольмском бассейне. В данной работе ставилось целью изучение особенностей и механизмов формирования стоковых течений в Борнхольмском бассейне, связанных с затоком через проливы североморских вод.

Интерес к данному исследованию обусловлен и тем, что понимание механизмов формирования особенностей распределения течений повышает уверенность в результатах их численных расчетов. Так как в дальнейшем рассчитываемые баротропные течения предполагается включить в модель распространения североморских вод в Борнхольмском бассейне, расчетная область была ограничена участком Балтийского моря, включающим лишь Борнхольмский бассейн. В настоящее время отмечается интерес к исследованию особенностей низкочастотных возмущений, возмущения уровня и течений и механизмов их формирования в Балтийском море [4, 5]. В данной работе основное внимание акцентировалось на исследовании влияния топографии на структуру баротропных течений, формирующихся в период затоков. При задании граничных условий на жидких границах можно исходить из того, что распространение низкочастотных возмущений, связанных с затоком через проливы вод, происходит в виде прогрессивной затухающей волны Кельвина [6]. Из-за большой фазовой скорости, составляющей около  $20 \text{ м/с}^{-1}$ , баротропная длинная волна проходит расстояние между жидкими границами за время около  $7 \cdot 10^3 \text{ с}$ , что соответствует  $1,4 \cdot 10^{-2}$  от пятисуточного периода. Возникающее при этом различие меняющихся с пятисуточным периодом расходов воды на жидких границах, различие фаз расходов на правой и левой жидких границах, определяющееся отмеченной разностью фаз волны, составляет величину, меньшую на порядок максимальной величины расходов. Предполагая

исследовать влияние топографии на формирующиеся течения, имеющимся различием в расходах можно пренебречь. Различие в расходах приводит к изменениям среднего уровня в области. Включение этого процесса в расчеты приводило бы к его наложению на результаты расчетов, характеризующих влияние топографии, и маскировало бы их. Крупные затоки в Балтийское море обычно представляют цепочку, состоящую из предварительного выноса вод из Балтики, следующего за ним крупного затока и далее снова выноса избытка воды. Продолжительность данного процесса обычно составляет один период длительностью от 5 до 30 суток [9, 10]. При моделировании заток воды через границы задается как продолжительный периодический процесс. Это делается для ослабления влияния начальных условий.

### Математическая модель

С целью исследования особенностей формирующихся при затоках баротропных течений и анализа влияния на данный процесс топографии в Борнхольмском бассейне использовалась баротропная гидростатическая модель, включающая следующую систему уравнений

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} - f v_m = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{c_b \rho_0}{H} \sqrt{u_m^2 + v_m^2} u_m + k_l \left( \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_m}{\partial t} + f u_m = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{c_b \rho_0}{H} \sqrt{u_m^2 + v_m^2} v_m + k_l \left( \frac{\partial^2 v_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial y^2} \right); \quad (2)$$

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

где  $u_m, v_m$  — составляющие средней по глубине скорости течений по осям  $x$  и  $y$  соответственно;  $\xi$  — возмущение уровня свободной поверхности моря;  $H$  — глубина;  $f$  — параметр Кориолиса;  $c_b$  — коэффициент придонного трения;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $k_l$  — коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости;  $t$  — время.

Последние слагаемые в правой части уравнений (1) и (2) использовались для сглаживания рассчитываемых характеристик и исключения возникающей при численных расчетах высокочастотной составляющей. Рассчитывались средние по глубине скорости течений и возмущение уровня в Борнхольмской впадине, обусловленные периодическим меняющимся расходом воды через западную и восточную жидкие границы. Заток воды аппроксимировался заданием на левой и правой жидких границах  $x$ -ых составляющих средних скоростей течений с помощью соотношения

$$u_m = u_{m0} * \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right),$$

где  $u_m$  — скорость течений на жидкой границе;  $u_{m0}$  — амплитуда изменения скорости течений на границе;  $T$  — период изменчивости течений;  $t$  — время.

На левой боковой границе  $u_{т0}$  задавалась равной  $100 \text{ см/с}^{-1}$ . Период  $T$  принимался равным 5 суткам. На правой границе скорость течений задавалась из условия равенства расходов на правой и левой границах. В качестве жидких границ рассматривались участки правой и левой границ в интервале от 30 до 70 узлов. Остальные участки боковых границ рассматривались как твердые. На твердых боковых границах в качестве начальных условий задавалось нулевое значение возмущения уровня моря и течений. Задача решалась на прямоугольной сеточной области размером по горизонтали  $80 \times 110$  расчетных узлов с шагом по горизонтали 1,8 км (рис. 1).

### Результаты расчетов

По расчетам распределение возмущения уровня в области на момент времени 6,25 суток, соответствующим моменту максимального затока (рис. 2, а), характеризуется достаточно однородным распределением по оси  $y$  наклона уровня в направлении вдоль этой оси. Скорости течений направлены преимущественно вдоль изолиний (рис. 2, б), что говорит об их квазигеострофическом характере. Нарушения однородности распределения изолиний возмущения уровня отмечаются на участках, характеризующихся значительными изменениями глубины моря (рис. 1, а). Отмеченные возмущения могут быть вызваны влиянием возникающей на неоднородностях рельефа дна топографической завихренностью. Для того чтобы выделить особенности воздействия топографии на формирование возмущения уровня, были произведены аналогичные расчеты для области с постоянной

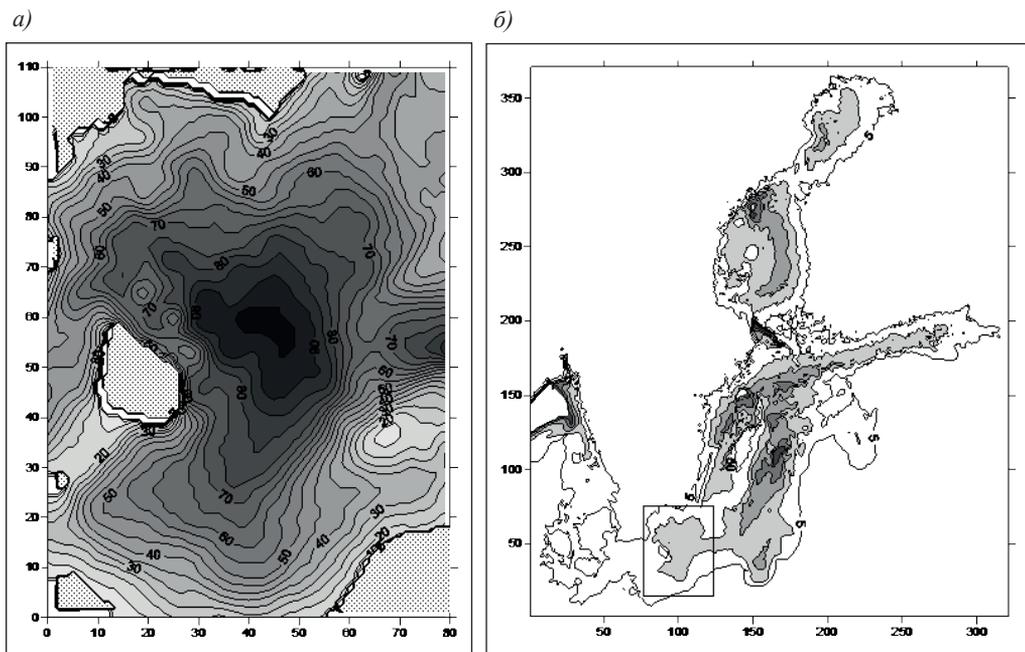


Рис. 1. Расчетная область Борнхольмского бассейна (а) и его расположение на акватории моря (б)

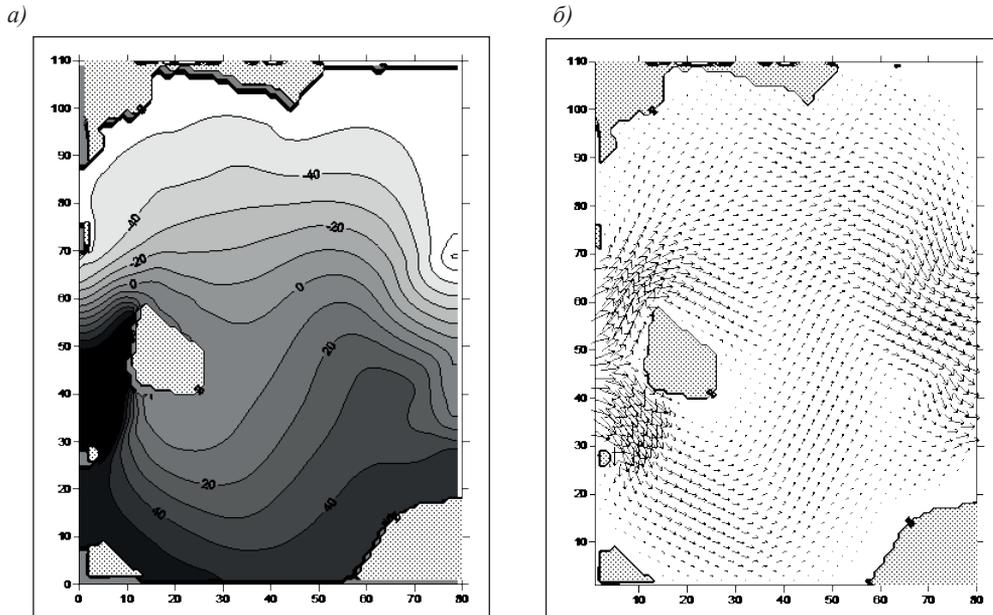


Рис. 2. Распределения возмущения уровня свободной поверхности [см] (а) и скоростей течений (б), рассчитанные на 6,25-е сутки с учетом топографии Борнхольмского бассейна

глубиной, равной 52 м, что соответствовало средней глубине расчетной области. Полученное по расчетам распределение уровня свободной поверхности характеризуется более однородным распределением изолиний (рис. 3). Это подтверждает важную роль рельефа дна в формировании картины распределения возмущения уровня и течений.

Далее была рассчитана разность между возмущениями уровня моря, полученными с учетом реального рельефа дна и при постоянной глубине. По рассчитанной разности возмущений уровня были найдены геострофические течения и вычислена формируемая ими завихренность. Для исключения мелкомасштабной неоднородности в распределении завихренности результаты расчетов были сглажены по области, площадью  $18 \times 18$  км. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

По расчетам в области восточного склона котловины в целом формируется отрицательная завихренность, а в районе расположения западного склона котловины — положительная. Это обусловлено тем, что в западной части котловины направленный на восток поток сопровождается увеличением глубины морского дна, а в восточной части котловины в направлении потока отмечается уменьшение глубины. Как известно, при движении потока в направлении увеличения глубины происходит формирование положительной топографической завихренности.

При движении потока в сторону уменьшения глубин формируется отрицательная завихренность. В восточной части котловины в окрестности Слупского желоба, формирующаяся завихренность существенно более выражена, чем

в ее западной части. Отмеченное усиление завихренности объясняется тем, что в окрестности Слупского желоба накладываются локальное увеличение наклона дна и усиление скорости баротропных течений. При этом в Слупском желобе на участке роста глубины в направлении потока отмечается область положительной завихренности. В западной части котловины поток вначале огибает остров Борнхольм и достигает области наклона дна, обладая относительно слабыми скоростями. Поэтому формирующаяся завихренность оказывается заметно меньшей, чем в правой части котловины. Лишь на участке юго-восточного склона мелководья, расположенного к юго-западу от Борнхольма, располагается небольшая область, характеризующаяся значительным наклоном дна в направлении потока при большой скорости баротропных течений, где отмечается формирование больших значений положительной топографической завихренности. Полученные результаты подтверждают важную роль процессов образования топографической завихренности в формировании особенностей распределения уровня и течений в Борнхольмском бассейне в период затoka и выноса североморских вод.

С целью уточнения структуры течений были рассчитаны траектории движения жидкости в расчетных узлах с координатами (40, 15), (40, 30) и (40, 45), лежащих на линии, расположенной вдоль оси  $y$ , по центру расчетной области (рис. 5). По расчетам в точке (40, 15), расположенной ближе остальных к берегу, траектория движения напоминает прямую линию (см. рис. 5, *a*), что характерно для прогрессивных инерционных волн. У точки с координатами (40, 30), лежащей на 25 км дальше от берега, чем предыдущая, траектория движения приобретает

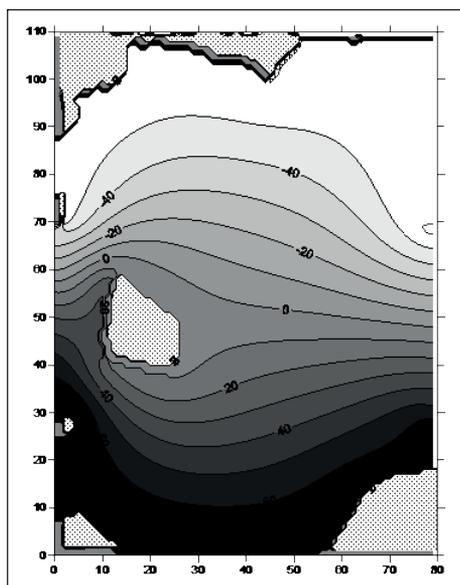


Рис. 3. Распределение возмущения уровня свободной поверхности (см), рассчитанное на 6,25-е сутки для постоянной глубины дна 52 м

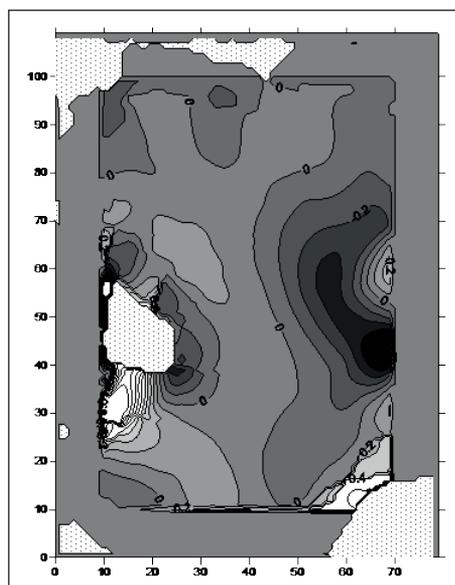


Рис. 4. Завихренность ( $\Omega_z \cdot 10^5 \text{c}^{-1}$ ), рассчитанная по разности возмущений уровня моря

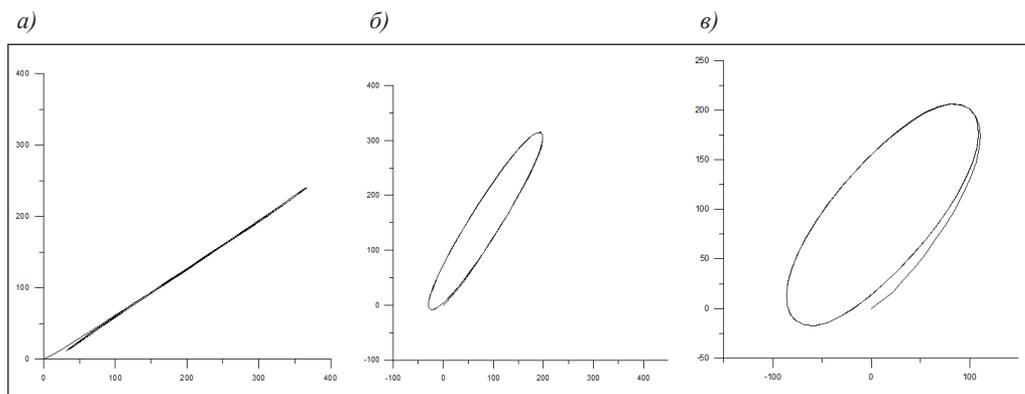


Рис. 5. Траектории движения жидкости, рассчитанные для разных узлов (с координатами):  
 $a$  — (40, 15);  $b$  — (40, 30);  $v$  — (40, 45) [Координаты даны в номерах  
 расчетных узлов по осям  $x$  и  $y$ ]

форму эллипса (рис. 5,  $b$ ). Еще в большей степени это проявляется для точки с координатами (40, 30), где поперечная ось эллипса заметно увеличила свои размеры (см. рис. 5,  $v$ ). Это свидетельствует о том, что низкочастотные волновые возмущения, обусловленные периодическим изменением скорости течений на жидких границах, распространяются у берегового контура в Борнхольмском бассейне в виде прогрессивной инерционной волны. Ближе к центру котловины эти волновые возмущения приобретают свойства волн Пуанкаре.

### Заключение

Результаты моделирования распространения низкочастотных баротропных возмущений в Борнхольмском бассейне позволили показать, что при изменчивости расходов на жидких границах Борнхольмского бассейна с периодом 5 суток устанавливается квазистационарная баротропная стоковая циркуляция, приспособленная к мгновенной величине расходов у жидких границ. Это обусловлено тем, что для низкочастотных волн с периодом, меньшим величины инерционного периода, роль инерции в уравнении движения оказывается существенно меньше роли ускорения Кориолиса.

На распределение возмущения уровня и течений существенное влияние оказывает топографическая завихренность, связанная с воздействием на основной поток неоднородности рельефа дна.

При распространении низкочастотных волн горизонтальная траектория движения жидкости у берега имеет форму линии. С удалением от берега она принимает форму эллипса, величина малого радиуса которого возрастает с удалением от берега. Таким образом, в удаленной от берега части бассейна волна приобретает свойства волн Пуанкаре.

### Литература

1. Владимирова О.М., Царев В.А. Роль бароклинных течений в распространении североморских вод в Арконском бассейне // Учен. зап. РГГМУ. 2014. № 35. — С. 42–49.

2. Владимирова О.М., Лукьянов С.В., Подрезова Н.А., Царев В.А. Особенности распространения придонных вод в центральной части Балтийского моря // Учен. зап. РГТМУ. 2014. № 35. — С. 31–41.
3. Динь Н.Х. Моделирование распространения придонных соленых вод в Борнхольмском бассейне // Сб. молодежн. науч. конф. «Комплексные исследования морей России» — Севастополь, 2016. — С. 54–58.
4. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А., Фукс В.Р. Свободные низкочастотные волны в Балтийском море // Метеорология и гидрология. 2004. № 11. — С. 53–64.
5. Куликов Е.А., Медведев И.П., Колтерман К.П. Роль баротропного водообмена в формировании спектра колебаний уровня Балтийского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. — С. 5–15.
6. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. — М.: Мир, 1984. — 398 с.
7. Vladimirova O., Tsarev V. Some features of bottom salty water formation in the Arcona basin by model results, IEEE/OES Baltic Symposium 2014, Measuring and Modeling of Multi-scale Interactions in the Marine Environment, Tallinn, p. 128.
8. Kouts T., Omstedt A. Deepwater exchange in the Baltic proper. 1993. Tellus. V. 45A, pp. 311–324.
9. Matthäus W., Franck H. Characteristics of major Baltic inflows — a statistical analysis, Continental Shelf Research, 12, 1992, pp. 1375–1400.
10. Meier M., Feistel R., Piechura J. and others // Ventilation of the Baltic Sea deep water: A brief review of present knowledge from observations and models Oceanologia, 48 (S), 2006, pp. 133–164.
11. Feistel R., Nausch G., Matth W., Hagen E. Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring // Oceaologia, 2003. 45 (4), 2003, pp. 623–642.