

*О.М. Владимирова, В.А. Царев*

## **РОЛЬ БАРОКЛИННЫХ ТЕЧЕНИЙ В РАСПРОСТРАНЕНИИ СЕВЕРОМОРСКИХ ВОД В АРКОНСКОМ БАССЕЙНЕ**

*O.M. Vladimirova, V.A. Tsaryov*

## **ROLE OF BAROCLINIC CURRENTS IN SPREADING OF THE NORTH SEA WATERS IN THE ARKONA BASIN**

*Представлена математическая модель формирования соленых придонных вод в Арконском бассейне при затопке в период нагона североморской воды. Модель включает систему нестационарных гидростатических уравнений, уравнение неразрывности, уравнение переноса соли и уравнение состояния. Моделируется приток соленой воды через пролив Зунд путем задания на границе с проливом периодического изменения расхода с периодом изменения 10 суток и солёности воды 20 ‰ при начальной солёности воды в Арконском бассейне 10 ‰.*

*Ключевые слова: Арконский бассейн, Балтийское море, придонная соленая вода, плотностные потоки, бароклинные течения, численная модель течений.*

*It is presented a mathematical model of the bottom saline water formation in the Arkona Basin during the North Sea water inflow. The model includes a system of hydrostatic equations of motion, the continuity equation, the transport equation and the equation of state. The salt water inflow through the Strait of Zund is modeled of by setting at the strait periodic changes in flow with a period of 10 days and water salinity of 20 ‰. The the initial salinity of the Arkona Basin is about 10 ‰.*

*Key words: Arkona Basin, Baltic Sea, bottom salt water, density flow, baroclinic currents, numerical flow model.*

### ***Введение***

Динамика солёности в Балтийском море в значительной степени связана с поступлением воды повышенной солёности через Датские проливы [5]. Североморская вода поступает вначале в Арконский бассейн. Далее её движение к центральной глубоководной части Балтийского моря происходит в виде последовательного заполнения цепочки связанных между собой котловин [4, 7]. На своем пути к глубоководной части моря происходит изменение солёности придонных вод. В итоге, солёность приходящих в центральную часть моря придонных вод, их объем, а также глубина их распространения во многом определяются объемом их поступления в Арконскую впадину и степенью их трансформации протяжении их пути [1]. Первые исследования временной изменчивости затопки североморских вод проводились для внешних проливов, включая Бельты и Зунд. Исходным материалом для исследований явились данные наблюдений за уровнем на прибрежных уровневых станциях и результаты измерений скоростей течений на плавмаяках. По результатам измерений расход в проливах характеризуется

значительной синоптической изменчивостью, обусловленной ветровыми нагонами в проливе Каттегат. Объем затока воды в период нагона может составлять сотни кубических километров и определяется в основном разностью уровней в Каттегат и в Арконской впадине. Однако попытки определения среднего расхода за период времени более месяца приводил к величине, близкой к нулю, меняющей знак с увеличением периода осреднения. Это объяснялось тем, что после затока следуют соответствующий вынос воды из моря. При этом значительная часть соленой воды, поступающая при затоке, выносится из моря при смене направления расхода в проливах. При этом возникает вопрос о доли поступившей в период североморской воды, которая остается в Арконском бассейне после последовавшего выноса вод. Также важно представлять механизм, определяющий сохранение в Арконском бассейне таких вод. Первые оценки временной изменчивости расхода придонных вод в Арконской впадине получил Стиджебрандт [6]. Воспользовавшись длительным рядом съемок вертикального распределения солёности в Арконской впадине на станции ВУ1, он получил оценки повторяемости интенсивности поступления придонных вод. По его оценкам, расходы воды, меньше  $30\,000\text{ м}^3\text{с}^{-1}$ , характеризуются обеспеченностью 73 %. При этом могут отмечаться расходы порядка  $100\,000\text{ м}^3\text{с}^{-1}$ , но их повторяемость очень невысокая, составляя несколько процентов. Им же рассчитана повторяемость различных значений солёности придонной воды в интервале 10–20 ‰. Он также отметил, что величина солёности придонных вод связана с интенсивностью поступления североморской воды. Однако в своих расчетах он использовал ряд допущений. Так, он полагал, что придонная вода располагается в виде придонной линзы, в пределах которой вода, поступающая из Северного моря через проливы, распространяется геострофически в сторону пролива в Борнхольмскую впадину. В этом случае, принимая двухслойный характер распределения солёности, удастся связать расход придонной воды с толщиной придонного слоя и разностью плотности верхнего и нижнего слоев. В настоящее время имеется возможность более детального рассмотрения процесса образования придонных солёных вод в Арконском бассейне, происходящего в результате периодических колебаний расходов через Датские проливы.

В данной работе с помощью численного моделирования исследуется процесс формирования придонной соленой воды в Арконском бассейне в результате периодического изменения расхода на границе с проливом Зунд. Поступление соленой воды происходит и через другие проливы. На данном этапе мы ограничили число источников поступления соленой воды с целью упрощения. Процесс заполнения котловины более соленой водой является негидростатическим [3] и в общем случае требует использования негидростатических уравнений движения. Однако при расположении вод повышенной плотности у наклонного дна формируется вертикальный градиент давления с горизонтальной составляющей, близкой по величине горизонтальной составляющей направленного вдоль наклона дна вектора превышения силы тяжести [2]. Это позволяет для описания рассматриваемого процесса воспользоваться системой гидростатических уравнений движения. Для описания динамики течений и процесса переноса соли использовались следующие уравнения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{sz} \frac{\partial S}{\partial z} \right) + K_l \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{sz} \frac{\partial S}{\partial z} \right) + K_l \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right), \quad (6)$$

где  $u, v, w$  — горизонтальные и вертикальная составляющие скорости;  $P$  — давление;  $\rho, \rho_0$  — плотность и стандартная плотность воды соответственно;  $g$  — ускорение свободного падения;  $f$  — параметр Кориолиса;  $K_z, K_{sz}$  — коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости и диффузии соответственно;  $x, y, z$  — горизонтальные и вертикальная координаты соответственно;  $t$  — время;  $S$  — соленость;  $\alpha$  — коэффициент халинного сжатия.

Предварительно исходная система преобразовывалась с использованием процедуры «спрямления дна». При преобразовании вводится новая вертикальная координата  $\sigma = z/h$ . При этом исходная система уравнений с учетом уравнения гидростатики в новой системе координат  $(x, y, \sigma, t)$  преобразуется к виду:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_0^\sigma \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma^* + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_z}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_0^\sigma \left( \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{h} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma^* + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_z}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\sigma}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\sigma}{h} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{1}{h} \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0. \quad (9)$$

При построении численного алгоритма на первом этапе рассчитывался уровень свободной поверхности. Далее по рассчитанному уровню находилось трехмерное распределение течений. На следующем шаге рассчитанные скорости течений использовались для расчета поля солености воды. Уравнения, необходимые для расчета уровня

свободной поверхности, получаются путем интегрирования в пределах толщины слоя уравнений движения (1)–(2) и уравнения неразрывности (4).

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\sigma}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\sigma}{h} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{1}{h} \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0. \quad (10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + fU = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gh^2}{\rho_0} \int_0^1 (1-\sigma) \left( \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{h} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma + \tau_{0y} + \tau_{by}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (12)$$

где  $V = h \int_0^1 v d\sigma$ ,  $U = h \int_0^1 u d\sigma$ .

При этом на твердых боковых границах используется условие непротекания. Для морской жидкой границы применяется условие излучения. Касательные напряжения трения на поверхности воды и у дна находятся из соотношений:

$$(\tau_{0x}, \tau_{0y}) = c_0 \rho_a \sqrt{u_a^2 + v_a^2} (u_a, v_a), \quad (13)$$

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = c_0 \rho_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2} (u_0, v_0), \quad (14)$$

где  $u_0, v_0$  — составляющие скорости ветра;  $u_a, v_a$  — составляющие скорости придонных течений;  $\rho_a$  — плотность воздуха.

Горизонтальные составляющие скоростей течений рассчитываются из уравнения движения по найденному предварительно вертикальному распределению градиента давления за счет уклона уровня и плотностных градиентов. При этом уравнение движение для продольных составляющих скоростей течений записывается в комплексном виде. У дна горизонтальные составляющие скоростей течений принимаются равными нулю. Вертикальная составляющая скорости течений находится из уравнения неразрывности. Представленная модель использовалась для расчета в Арконском бассейне стоковых течений, обусловленных расходом воды на жидкой границе с проливом Зунд, и бароклинных течений, связанных с горизонтальной неоднородностью поля плотности, формирующейся при распространения соленой воды. Расчетная область включала Арконскую впадину (рис. 1а), характеризующуюся распределением глубины морского дна, представленным на рис. 1б. На боковой границе в области залива воды через пролив Зунд задавались скорости течений и соленость. На границе с Борнхольмским бассейном использовалось условие свободного излучения и условие отсутствия горизонтального турбулентного потока соли. Начальная соленость воды в расчетной области принималась равной 10 ‰. Соленость поступающей через пролив воды составляла 20 ‰. Изменение расхода задавалось в виде синусоиды с периодом 10 суток. Максимальная скорость

течений на границе соответствовала расходу через пролив, равному  $100\,000\text{ м}^3\text{с}^{-1}$ . В течение первых 5 суток происходит заток воды, а в течение последующего времени — вынос.

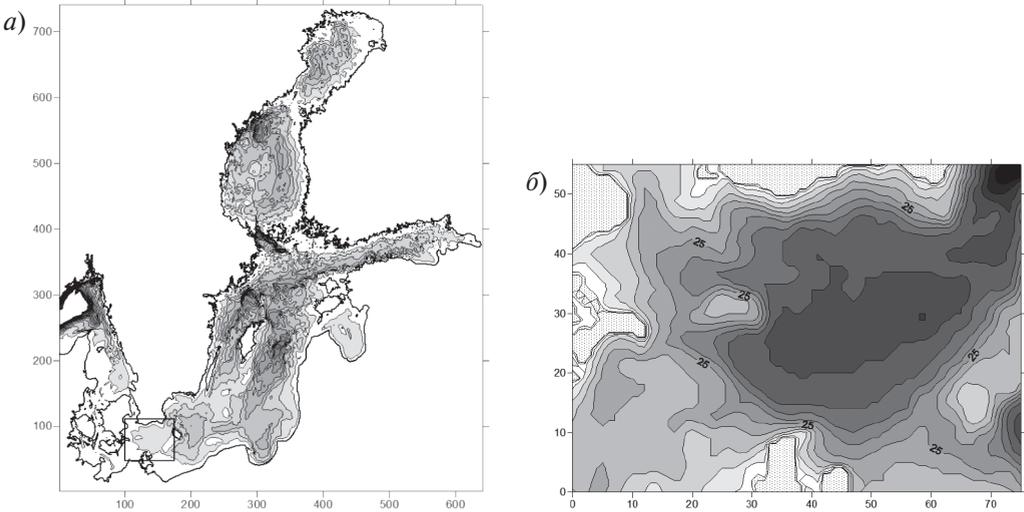


Рис. 1. Расположение расчетной области (а) и распределение глубины (б)

По расчетам максимальные скорости течений формируются вблизи пролива и убывают с удалением вглубь области. Течения на значительном расстоянии от границы сохраняют южное направление с незначительным отклонением к центру области, совпадающее с направлением изобат. Наибольшие скорости течений отмечаются в мелководных районах. Относительно высокие скорости течений отмечаются также на мелководье в верхнем правом углу области в районе Борнхольмского пролива, где течения направлены в сторону пролива (рис. 2).

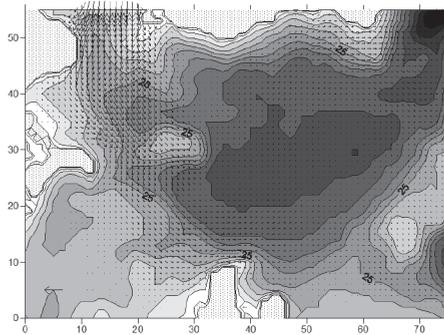


Рис. 2. Распределение скоростей течений, соответствующих моменту максимального затока через пролив Зунд (стрелка в левом нижнем углу скорость течений  $100\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ). Изобаты проведены через 5 м)

Из-за медленного изменения расходов на границе характер распределения скоростей течений не менялся. Менялась лишь их величина. При изменении направления скоростей течений на противоположное скорости течений в области также меняли свое направление. Через двое суток под влиянием стоковых и бароклинных течений произошло продвижение придонных соленых вод в направлении стоковых течений (рис. 3а). Распределение придонной солености на этот же момент времени, полученный без учета бароклинных течений (рис. 3б) практически не отличается от предыдущего. Это говорит о том, что в начальный период залива соленых вод из пролива их распространение в области происходит в основном под влиянием стоковых течений. Влияние бароклинных течений на данном этапе незначительно. Это объясняется тем, что на незначительном расстоянии от пролива стоковые течения сохраняют значительную величину и превышают бароклинные течения.

С течением времени соленые придонные воды, удаляясь от пролива, попадают в область с меньшими скоростями стоковых течений. Это повышает относительную роль бароклинных течений в переносе придонных соленых вод. Так, при сопоставлении распределений придонной солености, полученных с учетом бароклинных течений (рис. 4а) и без их учета (рис. 4б) на момент окончания залива через границу, соответствующий пятым суткам, можно отметить, что в первом случае размер области придонных соленых вод заметно больше.

При смене направления стоковых течений вначале их скорость остается незначительной. Однако к моменту 7,5 суток она достигает максимальных значений. Однако, несмотря на изменение направления стоковых течений в этот период, продолжается распространение придонных вод вглубь области (рис. 5а). По результатам расчетов, выполненных без учета бароклинных течений для данного периода отмечается вынос соленых вод (рис. 5б). Это подтверждает усиление роли бароклинных течений на процесс распространения придонных вод на этапе общего баротропного стока воды из Арконы.

На завершающем этапе периода стока область распространения придонных соленых вод не только не уменьшается, а даже возрастает (рис. 6а). В то же время при расчете солености без учета бароклинных течений придонная соленая вода по завершению периода стока практически полностью выносится (рис. 6б). Сохранившийся небольшой участок соленой воды около пролива обусловлен, вероятно, влиянием горизонтальной диффузии. То что в период возвратных стоковых течений придонные соленые воды не уходят со стоковыми течениями, объясняется тем, что по завершению залива придонные воды распространяются в область относительно слабых стоковых течений. Кроме этого, накопление придонных вод и увеличение толщины придонного слоя приводит к возрастанию бароклинных течений, способствующих дальнейшему переносу соленых вод вглубь области.

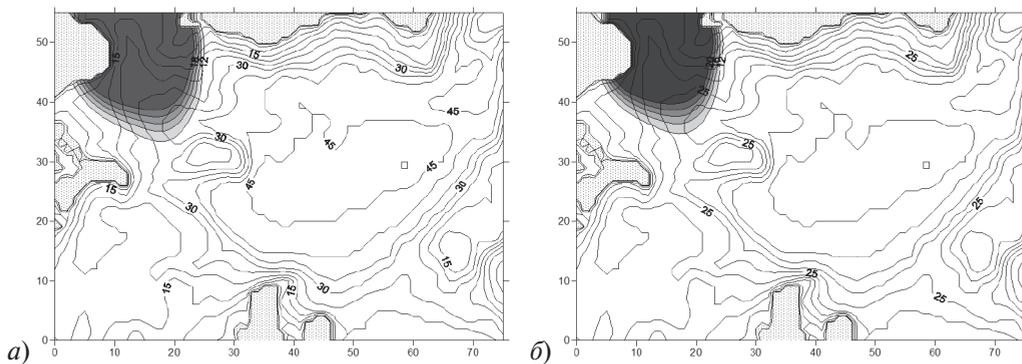


Рис. 3. Распределение придонной солености через 2 суток, рассчитанные с учетом бароклинных течений (а) и без их учета (б)

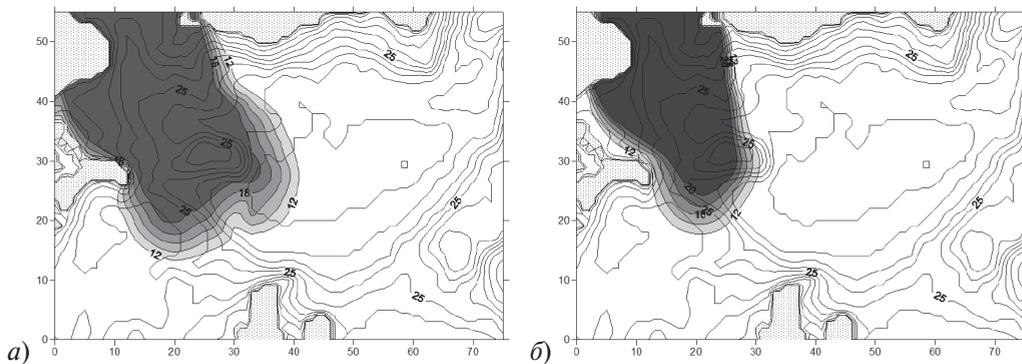


Рис. 4. Распределение придонной солености через 5 суток, рассчитанные с учетом бароклинных течений (а) и без их учета (б)

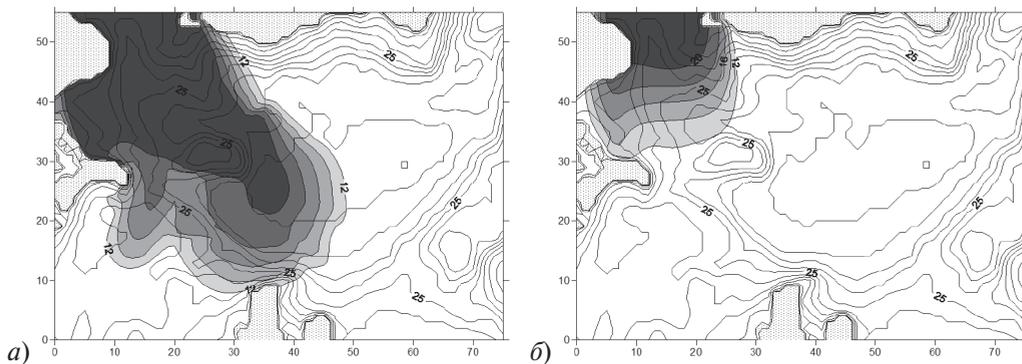


Рис. 5. Распределение придонной солености через 8 суток, рассчитанное с учетом бароклинных течений (а) и без их учета (б)

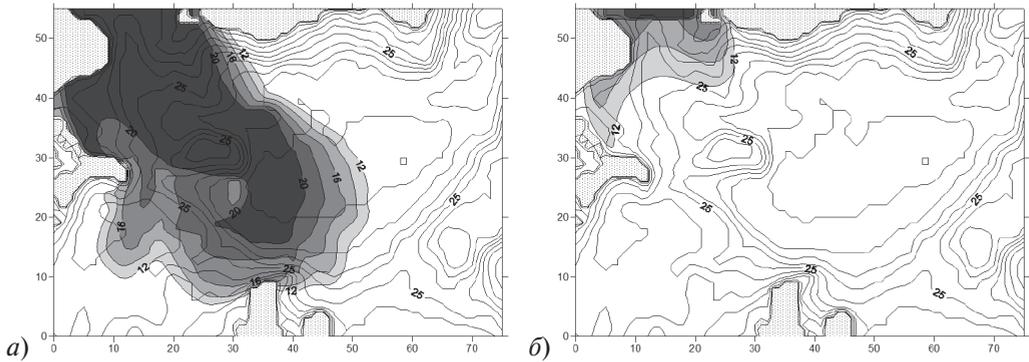


Рис. 6. Распределение придонной солености через 2 суток, рассчитанной с учетом бароклинных течений (а) и без их учета (б)

По результатам представленных результатов моделирования распространения придонной воды можно сделать следующие выводы о роли бароклинных течений в данном процессе. В окрестности пролива, где отмечаются максимальные стоковые течения, перенос соленых вод при затопке определяется в основном стоковыми течениями. В течение периода затопки при удалении придонных вод от пролива происходит распространение придонных вод в центральную часть Арконского бассейна, где величина стоковых течений уменьшается. Это, а также увеличение толщины придонного слоя, связанное с накоплением соленых вод, приводит к возрастанию бароклинных течений относительно стоковых. Поэтому при смене знака стоковых течений не только не происходит уменьшения размера области придонных вод, но даже отмечается ее некоторое увеличение.

### Литература

1. Журбас В.М., Пака В.Т. Интрузионное расслоение галоклина в Готландском бассейне, обусловленное большим затопком североморских вод в Балтику в январе 1993 г. // Изв. РАН ФАО, 1997, т. 33. № 4, с. 549–551.
2. Подрезова Н.А., Царев В.А. Эффекты негидростатичности в формировании распределения давления в окрестности плотностной линзы. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 29, с. 131–137.
3. Царев В.А. Теория и расчеты распространения придонных вод в море. — СПб.: РГГМУ, 2001. — 60 с.
4. Kouts T, Omstedt A. Deepwater exchange in the Baltic proper. — Tellus, 1993, vol. 45A, pp. 311–324.
5. Lehmann A., Myrberg K., Getzlaff K. Salinity dynamics of the Baltic sea. // Baltic Earth Newsletter, 2013, № 1, pp. 3–5.
6. Stigebrandt A. Computations of the flow of dense water into the Baltic Sea from hydrographical measurements in the Arkona Basin. // Tellus, 1987, vol. 39A, pp. 170–177.
7. Feistel R., Nausch G., Matthaus W., Hagen E. Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring 2003. // Oceanologia, 2003, № 45(4), pp. 623–642.