

М.В.Сендеров, А.И.Мизюк

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ВОДООБМЕН  
ЧЕРЕЗ БОСФОР И ФОРМИРОВАНИЕ  
ВЕРТИКАЛЬНОЙ ХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Реализована конфигурация модели циркуляции *NEMO OPA* с грубым пространственным разрешением для региона Черного, Азовского и Мраморного морей. В качестве начальных условий для Черного и Азовского морей были выбраны несколько значений равномерно распределенной по вертикали и горизонтали солёности, температура также задавалась однородной. В результате численных экспериментов формируется халинная структура, качественно близкая к наблюдаемой. Во всех расчетах значение расхода в верхнебосфорском течении в два раза больше, чем в нижнебосфорском.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *вертикальная халинная структура, численное моделирование, Черное море, пролив Босфор*

**Введение.** Хорошо известно, что формирование гидрологического режима Черного моря зависит от пролива Босфор [1]. На данный момент водообмен через пролив и характер влияния на водные массы бассейна изучены не в полном объёме.

Есть несколько объяснений возникновения халинной структуры Черного моря. Одно из них – теория черноморского потопа Уильяма Райана и Уолтера Питмена [2], которая сформулирована в 1996 г. американскими геологами из Колумбийского университета. Гипотеза утверждает, что около 5600 г. до н.э. произошло землетрясение, послужившее причиной образования пролива Босфор и начала втока солёных мраморноморских вод в пресный черноморский бассейн. Вследствие потопа была затоплена территория в 155 тыс. км<sup>2</sup>, ориентировочное положение границ бассейна показано на рис.1. На месте Босфора в течение 300 дней существовал колоссальный водопад, через который в сутки переливалось приблизительно 40 км<sup>3</sup> воды (в 200 раз больше объема воды, проходящего через Ниагарский водопад). После прекращения мощного потока вода в бассейне приобрела начальную солёность. В результате описанных явлений начала формироваться вертикальная халинная структура Черного моря, близкая к наблюдаемой в настоящий момент.

Пролив Босфор играет важную роль в водном балансе Черного моря. Течения в этом проливе обусловлены наличием двух факторов. Нижнебосфорское течение возникает вследствие разности давления, вызванной более высокой солёностью средиземноморских вод (примерно 38 ‰) по сравнению с солёностью Черного моря (примерно 18 ‰). Влияние речного стока, осадков и испарения приводит к разности уровней, тем самым образуя верхнебосфорское течение. Положительный пресноводный баланс (превышение стока рек и осадков над испарением) и приток высокосолёных мраморноморских вод через Босфор обуславливают резкую стратификацию вод

© М.В.Сендеров, А.И.Мизюк, 2017

Черного моря и ослабленное вертикальное перемешивание в слое основного пикноклина. Такие особенности водообмена формируют наблюдаемое вертикальное распределение солёности в бассейне [1].

О формировании Черного моря мы знаем лишь из гипотез и предположений. Отсутствие достаточного количества натуральных измерений как океанографических, так и палеоданных не позволяют нам восстановить правдоподобную картину. Поэтому будет целесообразно использовать численные модели для восстановления халинной структуры Черного моря [3].

В настоящей работе для расчета вертикальной халинной структуры предлагается использовать междисциплинарную модель *NEMO* [4]. Данный комплекс позволяет выполнять расчеты гидротермодинамики океана, расчета динамики и термодинамики ледового покрова, переноса пассивной примеси и т.п. В его основе лежит модель циркуляции вод океана *OPA*, которая долгое время использовалась для климатических расчетов. Модельный комплекс *NEMO* хорошо зарекомендовал себя при реализации научных проектов 7-й Европейской Рамочной Программы (*EU FP 7*) *MyOcean* и *MyOcean2* [5].

Основная цель данной работы – оценить влияние начальных условий «сотворения мира», исследовать формирование халинной структуры Черного моря и ее долгопериодную изменчивость. В первом разделе кратко описывается используемая численная модель циркуляции моря и отмечены особенности ее реализации для расчетов с грубым пространственным разрешением, также приводится постановка задачи. Второй раздел посвящен анализу полученных результатов.

**Краткое описание конфигурации модели и постановка задач.** Численные эксперименты были выполнены с использованием региональной конфигурации модельного комплекса *NEMO* [4], ядро которого основано на численной трехмерной нелинейной модели циркуляции *OPA* [4]. В ней использована система примитивных уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости, приведенные в [4], которые при выборе правой тройки ортогональных векторов  $i, j, k$  ( $i$  направлен на восток,  $j$  – на север,  $k$  – вверх) имеют вид:

$$\frac{\partial U_h}{\partial z} = - \left[ (\nabla \times U) \times U + \frac{1}{2} \nabla (U^2) \right]_h - f k \times U_h - \frac{1}{\rho_0} \nabla_h p + D^U + F^U, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot U = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla(TU) - D^S, \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\nabla(SU) - D^S, \quad (5)$$

$$\rho = \rho(T, S). \quad (6)$$

где  $U = U_h + wk$  – вектор скорости течений (индекс « $h$ » означает вектор в горизонтальной плоскости  $Oij$ );  $f = 2\Omega k$  – параметр Кориолиса;  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $D^U, D^T, D^S$  – члены, описывающие параметризацию подсеточных процессов для импульса, температуры и солёности.

В модели представлен ряд уравнений состояния (6), из которых была выбрана формула ЮНЕСКО.

Дискретизация системы уравнений выполнена на сетке «С» по терминологии Аракавы [6]. Уравнения движения (1) представлены в форме Громеки – Лэмба. Для нелинейных слагаемых в уравнениях переноса – диффузии (4), (5) используется TVD схема [7]. Вертикальное турбулентное перемешивание в модели рассчитывается с использованием гипотезы замыкания  $k$ - $\varepsilon$  работы [8]. Она основана на следующих уравнениях

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_M}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B + \varepsilon, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_M}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P + c_{\varepsilon 3} B - c_{\varepsilon 2} \varepsilon), \quad (8)$$

где  $B = -K_H N^2$ ,  $P = K_M M^2$ ,  $M^2 = \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2$ ,  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\varepsilon$  – скорость диссипации,  $U_i$  – осреднённый компонент скорости,  $\sigma_\varepsilon$  – эмпирическая постоянная,  $c_{\varepsilon 1}$ ,  $c_{\varepsilon 2}$ ,  $c_{\varepsilon 3}$  – константы, определяемые функцией устойчивости.

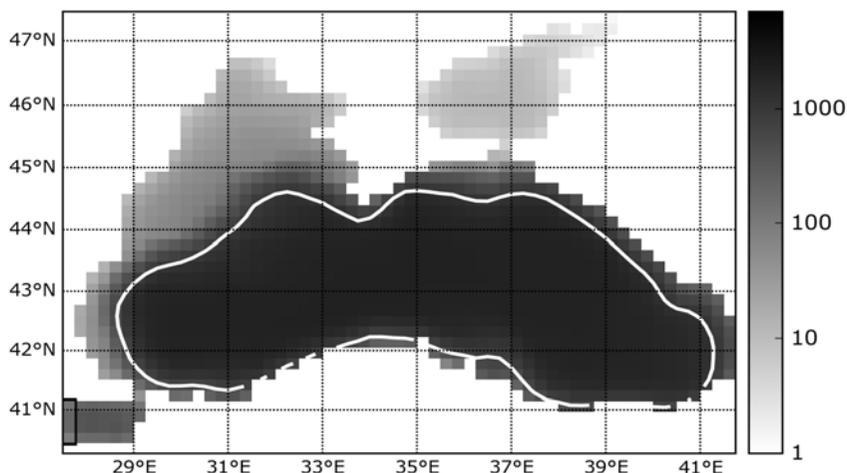
Уровень моря рассчитывается на основе схемы расщепления по времени [9]. Для параметризации горизонтального турбулентного обмена используется бигармонический оператор с коэффициентами ( $-5 \cdot 10^{10}$  м<sup>4</sup>/с) для вязкости и ( $-1 \cdot 10^{11}$  м<sup>4</sup>/с) для диффузии тепла и соли. Такой выбор значений параметров был сделан в результате предварительных численных экспериментов, позволивших получить поля скоростей течений без численного шума. Выбор коэффициентов требует более детального исследования, которое выходит за рамки данной работы.

Используются следующие граничные условия. На твердых боковых границах для компонент скорости ставится условие прилипания. На дне задается нелинейное трение. Для уравнений переноса – диффузии тепла и соли на боковых границах и дне ставятся условия отсутствия потоков. На поверхности используется условие  $\partial_t \eta = w|_{z=0} + P + R - E$ . В Мраморном море используется открытая граница (рис.1). На ней задаются профили температуры и солёности и ставится условие свободного протекания, которое описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial n} = 0. \quad (10)$$

В начальный момент времени во всех расчетах уровень в морях задается однородным по пространству: нет перепада между Средиземным и Черным морями. В используемой конфигурации учитываются климатические расходы 11 рек. Для этого применяется следующий алгоритм: реки в точках впадения рассматриваются как столб жидкости, проникающий во все боксы от поверхности до дна в данной точке. Во всех реках задаются среднемесячные значения температуры и значение солёности, равное 2 ‰. Температура, солёность и



Р и с . 1 . Топография дна в приведенной конфигурации с разрешением 20 км: положение первоначальной границы Черноморского бассейна [2] (белая линия), положение открытой границы в Мраморном море (черный прямоугольник).

уровень корректируются в этих точках, кроме того, используется вертикальное перемешивание в слое 10 м с увеличенным коэффициентом. Проливы Босфор и Керченский разрешаются явно.

Топография дна (рис.1) для конфигурации бассейна Черного моря строилась на основе данных цифрового массива работы [10]. Используется регулярная географическая сетка, покрывающая бассейны Черного, Азовского и Мраморного морей с шагом по горизонтали порядка 20 км. Дискретизация по вертикали осуществляется с использованием 34 нерегулярных  $z$ -горизонтов с увеличением разрешения у поверхности: 1,25; 3,83; 6,51; 9,34; 12,38; 15,70; 19,42; 23,68; 28,71; 34,79; 42,31; 51,78; 63,91; 79,58; 99,89; 126,18; 159,96; 202,83; 256,26; 321,45; 399,04; 489,03; 590,77; 703,09; 824,48; 953,37; 1088,23; 1227,75; 1370,80; 1516,50; 1664,16; 1813,26; 1963,41; 2114,32 м. Шаг по времени – 10 минут.

Тестовые расчеты проводились на период 67 модельных лет. Так как пролив разрешается явно, а размер ячейки сетки равен  $20 \times 20$  км, то ширина пролива составила 20 км. Глубина пролива равна 50 м. Перед началом проведения расчетов была проведена оценка начальной солёности Черного моря. По теории 300 дней в бассейн втекало  $40 \text{ км}^3$  в сутки. Соответственно за этот период 12 тыс.  $\text{км}^3$  воды попало в бассейн. Площадь затопления составила 155 тыс.  $\text{км}^2$ . По оценке через год после образования пролива начальная солёность приблизительно составляет 1 ‰. После того как уровень в Черном море поднялся на 140 м, если считать скорость притока неизменной, солёность должна была стать 4 ‰. За время поднятия уровня и осолонения бассейна режим моря не мог выйти на квазистационарный уровень. Поэтому значения начальных условий в наших расчетах начинаются с 8 ‰.

В первом тестовом расчете в качестве начальных условий в бассейнах Черного и Азовского морей выбирались равномерно распределенная по вертикали и горизонтали солёность и температура со значениями 16 ‰ и  $6^\circ\text{C}$  соответственно.

Результаты первого тестового расчета показали, что расход воды через пролив в 10 раз превысил климатические значения. Осолонение бассейна происходило слишком быстро, в результате чего сформировалась равномерно распределенная по вертикали халинная структура с завышенной соленостью. На сороковой расчетный год соленость достигла 21 ‰ на поверхности, и ее вертикальное распределение было практически равномерным. Это плохо согласуется с временными масштабами, предложенными в гипотезе Райана – Питмена [2]. Вследствие неудовлетворительных результатов моделирования была проведена дополнительная настройка параметров. В частности, был использован искусственный прием, предложенный авторами модели [4], который называется «полуоткрытая ячейка». С его помощью зональный размер ячейки в проливе Босфор варьировался. Были проведены численные эксперименты при ширине ячейки 5; 3 и 2 км. Наиболее удовлетворительные результаты были получены при ширине 2 км.

Тестовые расчеты проводились без учета испарения и осадков на поверхности. В этих расчетах осолонение бассейна происходило слишком медленно. Поэтому в новых расчетах учитывалась средняя по акватории разность между испарением и осадками ( $7,515 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

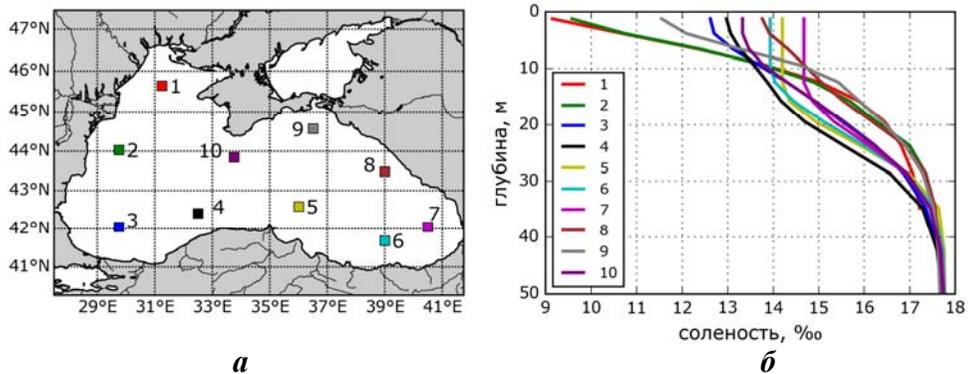
Из гипотезы следует, что после открытия пролива начальная соленость Черного моря изменилась. Поэтому для основных численных экспериментов в качестве начальных условий для Черного и Азовского морей была выбрана равномерно распределенная по вертикали и горизонтали начальная соленость  $S_i$  со значениями 8; 12; 16; 18 и 22 ‰, (варианты расчетов  $p1$ ,  $p2$ ,  $p3$ ,  $p4$ ,  $p5$  соответственно). Температура в начальный момент везде однородна и равна 6 °С. В Мраморном море начальные условия температуры и солености максимально приближены к натурным данным. Численные эксперименты моделируют попадание соленой мраморноморской воды в черноморский бассейн.

**Результаты численного моделирования.** В начале расчета на этапе раскрутки модели, время которого составляет приблизительно 40 лет, происходит распреснение верхнего 50 м слоя из-за влияния стока рек. Ниже этого уровня наблюдается увеличение солености, что соответствует глубине проникновения высокосоленных вод через пролив Босфор. Распреснение происходит в течение 60 лет, после чего значение солености на поверхности начинает увеличиваться. Из расчетов также видно, что наибольшее распреснение происходит в расчетах с большей начальной соленостью ( $p4$  и  $p5$ ).

Результаты, максимально приближенные к реальной картине, были получены в расчете  $p3$ . При этом расход воды в верхнебосфорском и нижнебосфорском течениях в среднем количественно приблизились к климатическому значению [11]. Вследствие этого произошло резкое увеличение солености, среднее значение которой по акватории Черного и Азовского морей увеличилось с 6 до 12 ‰ и вышло на квазистационарный уровень приблизительно за 40 лет.

Дальнейший анализ результатов показал формирование качественно близкой к настоящему халинной вертикальной структуры (рис.2). Ниже 45 м соленость для всех профилей практически не изменяется по глубине.

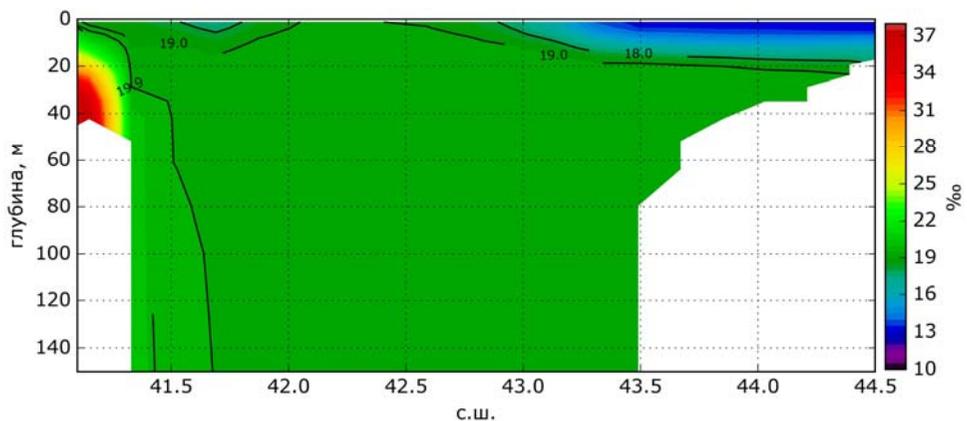
Такое распределение солености связано с глубиной пролива Босфор. Вток соленой воды происходит на глубине 50 м (рис.3).



Р и с . 2 . Положение станций в бассейне Черного моря (а), профили солёности на этих станциях на 738-ой расчетный год (б).

Одним из основных результатов проведенных экспериментов является установление верхнебосфорского и нижнебосфорского течений, причем во всех расчетах значение расходов в верхнем Босфоре в среднем в два раза превышают нижний (рис.4). Данный результат качественно соответствует данным наблюдения. Важно отметить, что такое отношение устанавливается и при различной ширине ячейки в проливе. Этот результат интересен тем, что на данный момент уровень Черного моря выше уровня Мраморного, и присутствует большой приток пресных речных вод. Данное соотношение образуется лишь за счет разности в солёности и наличии стока рек. Помимо этого, в расчете  $p3$  формируется циклоническая крупномасштабная циркуляция только за счет влияния водообмена через пролив и стока рек.

**Выводы.** Численные эксперименты в разработанной конфигурации модели с грубым разрешением позволили получить следующее. Подобрана ширина ячейки сетки (2 км) таким образом, что расходы верхне- и нижнебосфорского течений получились близкими к значениям, описанным в [1]. При различных начальных условиях в бассейнах Черного и Азовского морей устанавливается соотношение между верхне- и нижнебосфорским течениями: значение расхода в верхнем в два раза больше чем в нижнем. Такое соотношение согласуется с архивными данными [1]. Анализ резуль-



Р и с . 3 . Разрез поля солёности на 250-ый расчетный год.

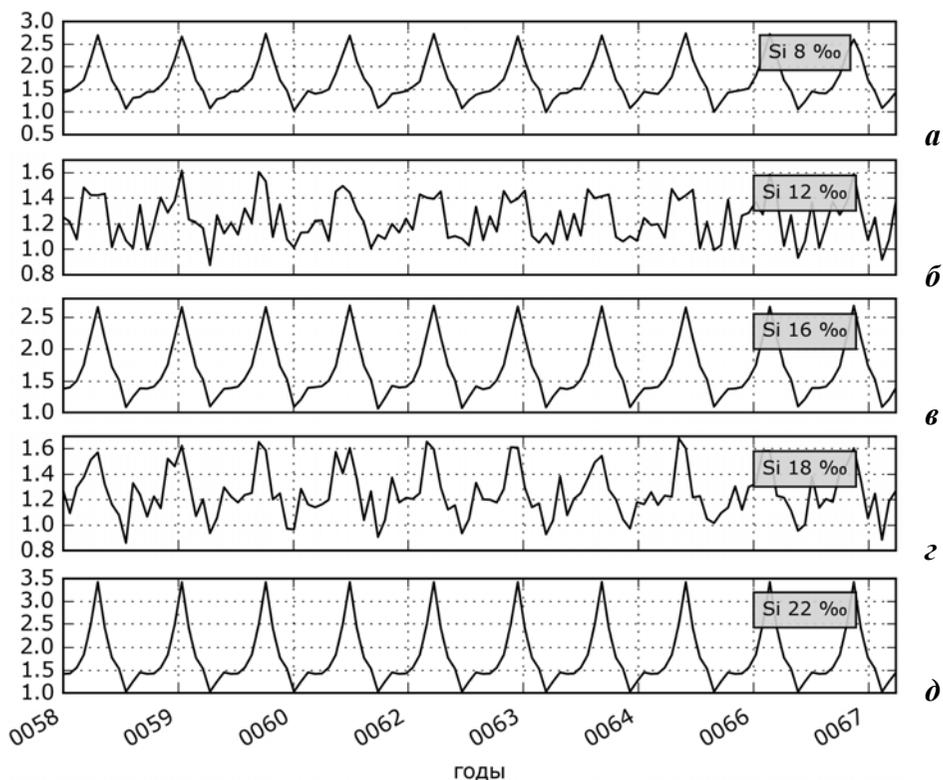


Рис. 4. Отношение расхода верхнебосфорского течения к нижнебосфорскому с различными начальными условиями солёности  $S_i$  в вариантах расчетов  $p_1$  (а),  $p_2$  (б),  $p_3$  (в),  $p_4$  (г),  $p_5$  (д).

татов экспериментов показал, что формируется халинная структура качественно близкая к современной. Во всех расчетах формируется крупномасштабная циркуляция только за счет влияния водообмена через пролив и стока рек.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богданова А.К.* Водообмен через Босфор и его роль в перемешивании вод Черного моря.– Киев: Наукова думка, 1969.– 245 с.
2. *Ryan W.B., Pitman W.C.* Noah's flood: the new scientific discoveries about the event that changed history.– New York: Simon and Schuster, 1999.– 319 p.
3. *Мамаев О.И.* Простая модель осолонения Черного моря // *Океанология.*– 1994.– т.34, № 6.– С.829-832.
4. *Madec G.* NEMO reference manual, ocean dynamics component // *Note du pôle de modélisation.*– France: Institut Pierre Simmon Laplace, 2008.– Rep.27.– P.1288-1619.

5. *Demyshev S., Knysh V., Korotaev G., Kubryakov A., Mizyuk A.* The MyOcean Black Sea from a scientific point of view // Mercator Ocean Quarterly Newsletter.– 2010.– № 39.– P.16-24.
6. *Mesinger F., Arakawa A.* Numerical methods used in atmospheric models // GARP Publication Series.– 1976.– № 17.
7. *Zalesak S.T.* Fully multidimensional flux corrected transport algorithms for fluids // J. Comput. Phys.– 1979.– 31.
8. *Rodi W.* Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids // J. Geophys. Res.– 1987.– 92 (C5).– P.5305-5328.
9. *Roullet G., Madec G.* Salt conservation, free surface, and varying levels: a new formulation for ocean general circulation models // J. Geophys. Res.– 2000.– 105.– P.23927-23942.
10. *Авдеев А.И.* Разработка методологии исследования рельефа дна Черного моря и его влияние на процессы, протекающие в зоне сопряжения суша-море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2001.– вып.4.– С.179-187.
11. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря.– Севастополь, 2011.– 212 с.

Материал поступил в редакцию 01.12.2016 г.  
После доработки 10.05.2017 г.

M.V.Senderov, A.I.Mizyuk

#### INFLUENCE OF INITIAL CONDITIONS IN THE PROBLEM OF THE VERTICAL HALINE STRUCTURE FORMATION IN THE BLACK SEA CAUSED BY WATER EXCHANGE THROUGH THE BOSPHORUS STRAIT AND RIVER RUNOFF

The circulation model NEMO OPA with low-resolution configuration is implemented for basins of the Black, Azov and Marmara seas. As initial conditions for the Black and Azov seas several salinity values distributed on a vertical and a horizontal have been chosen, temperature was also uniform. Simulations allow revealing the formation of upper and lower currents in the Bosphorus Strait caused by the salinity difference between the Black and Marmara Seas. In the model runs the upper current volume discharge is two times higher than the lower one.

**KEYWORDS:** vertical haline structure, numerical modeling, the Black Sea, the Bosphorus strait