

УДК 532

## РАЗНОМАСШТАБНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ В ЧЕРНОМ МОРЕ И ДНЕПРОБУГСКОМ ЛИМАНЕ

І.О. Бровченко, В.С. Мадерич, К.В. Терлецька

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины*

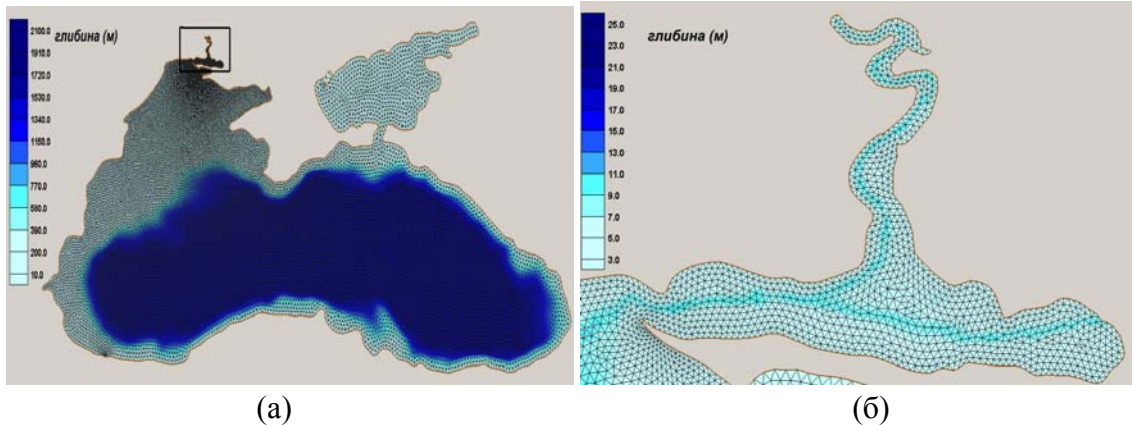
e-mail: ibrovchenko@gmail.com

### **Введение**

На данный момент во многих областях науки, в частности, в задачах прибрежной гидродинамики, становится возможным так называемое разномасштабное моделирование, то есть одновременное моделирование процессов, которые имеют важные особенности на разных масштабах, как пространственных, так и временных. Целью данной работы было воспроизвести глобальную циркуляцию в Черном море, и при этом наблюдать за локальными мелкомасштабными процессами формирования соленого клина в Днепро-Бугском лимане. Данная задача решалась с помощью численной гидродинамической модели SELFЕ, производящей расчеты на неструктурированной сетке, построенной для моделирования многомасштабных процессов. Расчеты проводились в параллельном режиме на 32 процессорах.

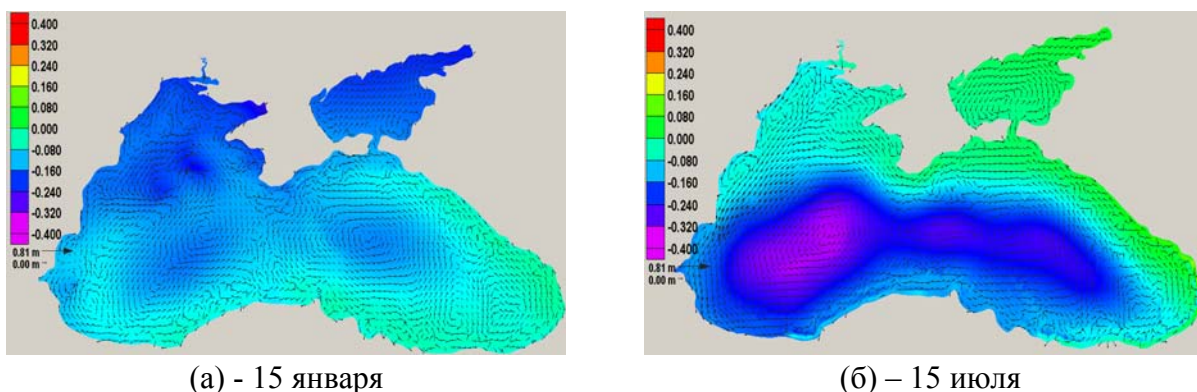
### **Описание системы Черное море - Днепро-Бугский лиман.**

Черное море - глубокое море, центральную часть которого занимает глубинная равнина, лежащая на двухкилометровой глубине, с крутыми склонами. Его площадь 422 тыс. км, а наибольшая глубина 2211 м. Карта глубин показана на рис.1. Днепро-Бугский лиман состоит из вытянутого в широтном направлении Днепровского лимана, длина которого 55 км, а ширина до 17 км, а также узкого (шириной от 5 до 11 км) Бугского лимана вытянутого в меридиональном направлении, длиной около 47 км. Средняя глубина Днепро-Бугского лимана составляет 4.4 м. Существует узкий, пригодный для судоходства по устью в Черное море, канал 10-метровой глубины. Днепро-Бугский лиман соединяется с Черным морем проливом 3.6 км в ширину. Для моделирования термогидродинамики использовалась трехмерная гидростатическая гидродинамическая модель SELFЕ [1], соединенная с моделью теплообмена с атмосферой [2]. Для моделирования взаимодействующей системы Черное море - Днепро-Бугский лиман была построена неструктурированная конечно-элементная сетка, состоящая из треугольных элементов с длиной стороны до 5 км в Черном море и от 800 метров до 1000 метров в Днепро-Бугском лимане. Расчетная сетка, содержит 17000 узлов и 33000 треугольных элементов представлена на рис. 1а-б. По вертикали использовалась комбинированная система координат, состоящая из 40 узлов: для поверхностного 50 метрового слоя использовалась сигма-система координат с 18 равномерных уровней, а 22 z-уровня были расположены в Черном море на глубинах 50, 55.6, 62.2, 69.2, 78.3, 88.6, 101.5, 118.3, 140.4, 170.3, 210.9, 266.0, 340.1, 437.5, 526.1, 716.0, 923.0, 1126.9, 1381.0, 1699.0, 2096.0, 2552 м соответственно.



**Рис. 1.** Неструктурированная конечно-элементная сетка Черного моря (а) для описания крупномасштабной циркуляции, и сгущение сетки в области Днепро-Бугского лимана (б)

В качестве начальных условий использовались трехмерные климатические поля температуры и солёности за январь из климатической базы данных. В качестве граничных условий на поверхности использовались данные реанализа ERA-40 с интервалом 6 часов. На поверхности задавалась температура воздуха, облачность, влажность, компоненты скорости ветра и атмосферное давление. Данные ERA-40 получены на основе глобального реанализа рядов атмосферных наблюдений, спутниковых данных и состояния поверхности на сетке 40 км. Для расчетов были выбраны данные реанализа за 1992 год. В качестве граничных условий на поверхности для солёности использовались условия релаксации на поверхности до заданного распределения солёности. Поля солёности на поверхности были взяты из климатической. В качестве граничных условий задавались расходы Днепра и Буга за 1992 год. Расход воды из Днепра в 1992 году колеблется в пределах от 400 до 1400 м<sup>3</sup>/с весной, в то время как средний расход воды из Южного Буга колеблется от 20 до 120 м<sup>3</sup>/с. Расходы пресной воды из Днепра, в отличие от Южного Буга, являются не просто сезонными, поскольку они регулируется плотиной из Каховского водохранилища, которое расположено на расстоянии 70 км от устья Днепра. Для того, чтобы уровень в море сохранялся - утечка воды через Босфор задавалась равной сумме притоков из Днепра и Буга.



**Рис. 2.** Результаты моделирования усредненных по глубине поля скорости и уровня свободной поверхности в Черном море (а) - 15 января, (в) - 15 июля 1992

Основным фактором, влияющим на режим течений в Днепро-Бугском эстуарии - это процесс перемешивания пресных вод рек с солёными морскими водами. Это

формірує солений клин в устьє реки (рис. 3а), який в літні місяці може досягати міста Херсон. Стратифікація в устьє коливається від майже нульової в східній частині лиману до двохшарової системи в західній морській частині Дніпро-Бугського естуарія. Ці процеси в значительній ступені залежать від сезону. Режимы проникновения солёности с моря и пресной воды из рек варьируются от стратифицированного (рис. 4) до частично перемешанного. Таким образом, летом соленый клин проникает дальше в устье реки, чем весной. Кроме того, солёность в верхнем слое летом гораздо выше, чем весной. Лиман покривається льдом з січня по лютий, а вітрові нагоны викликають коротко-хвильові стрибки солених клиньєв в устьях рек.

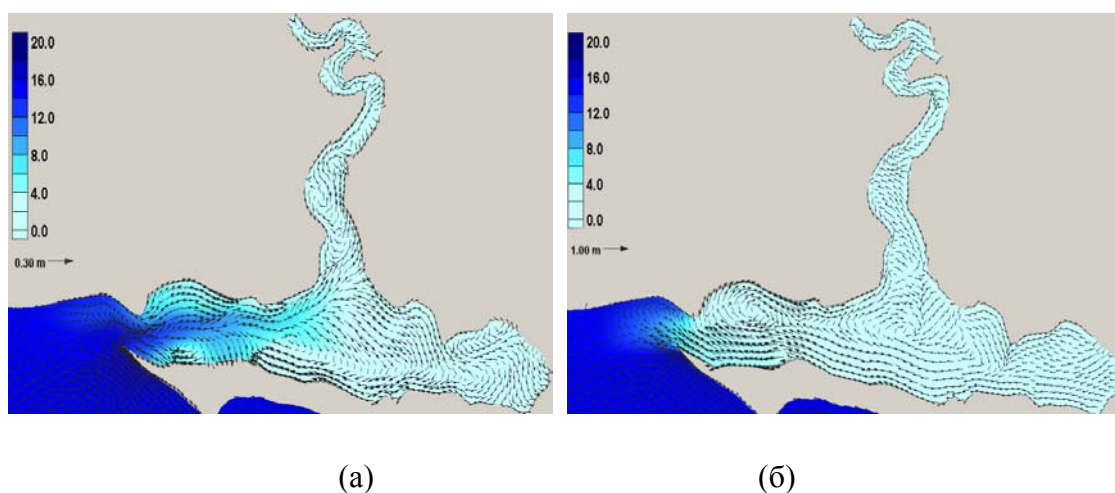


Рис. 3. Солёность и поле скорости на дне (а), и на поверхности (б) 15 октября 1992

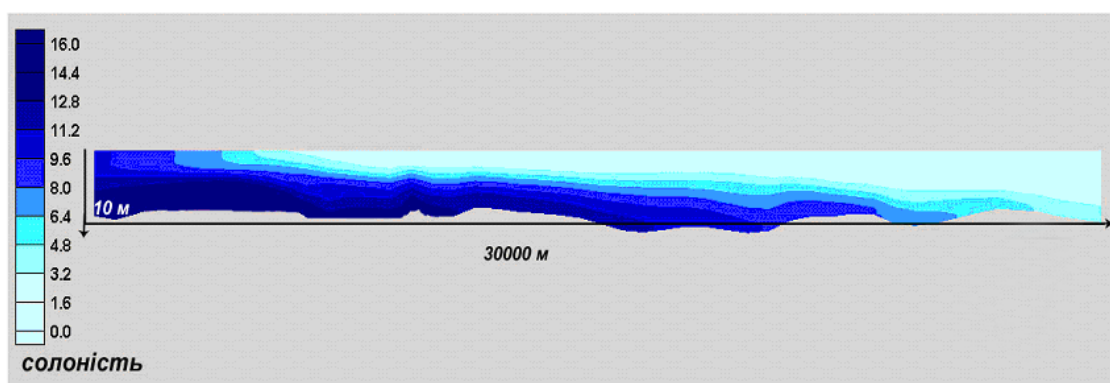


Рис. 4. Поле солёности в вертикальном сечении вдоль канала на момент 15 октября 1992

**Выводы.** В работе впервые было проведено трехмерное моделирование течений для системы Черное море - Днепро-Бугский лиман. Для моделирования термогидродинамики использовалась трехмерная гидростатическая гидродинамическая модель SELFE, соединенная с моделью теплообмена с атмосферой. В результате проведенного численного моделирования гидродинамических полей в Черном море,

можно наблюдать классическую картину образования вихревых структур. Показано, что циркуляцию в море определяет в основном Основная Черноморская течение (ОЧТ), которая проявляется в образовании замкнутых кольцевых течений, усиливаются и стабилизируются в осенний и зимний период. Отмечено, что западный круговорот к лету становится сильнее чем восточный. Также показано образование циклонов в западной и восточной глубинных регионах моря. В течение всего года наблюдается образование антициклонических вихрей между ОЧТ и берегом. Модель неплохо воспроизводит температурные режимы, что видно из качественного сравнения с климатическими полями температуры на поверхности моря и взятыми из баз данных гидрографического атласа Средиземного моря (MEDATLAS). В рамках глобального моделирования, особое внимание уделено области Днепро-Бугского лимана, для которой было сделано детализированную сетку. Для данной области подробно воспроизведено перемешивание пресных вод рек с солеными морскими водами. Воспроизведено формирование соленого клина в устье реки, который, как показано, в летние месяцы может подниматься до города Херсон. Стратификация в устье колеблется от почти нулевой в восточной части лимана, к двухслойной системе в западной морской части Днепро-Бугского эстуария. Показана сезонность процессов: летом соленый клин проникает дальше в устье реки, чем весной.

#### Список литературы

1. Zhang, Y.-L., Baptista, A.M. "SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation". *Ocean Modelling*. 21, 2008. - P. 71-96.
2. Кошебуцкий В., Мадерич В., Нестеров А., Хелинг Р. Моделирование распространения тепла во внутренних водах и прибрежных областях морей. *Прикладная гидромеханика*. Т. 6, 2004. - № 4. - С. 34-44.
3. Oguz T., Latun V.S., Latif M.A. at al. Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea // *Deep-Sea Res.* – 1993. – I, № 40. – P. 1597 – 1612.