

## ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОДЕЛЬЮ NEMO: ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ К ВЕРТИКАЛЬНОМУ РАЗРЕШЕНИЮ И СПОСОБАМ ОПИСАНИЯ ЛЕДОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Степанов В.Н.<sup>1</sup>, Струков Б.С.<sup>1</sup>, Реснянский Ю.Д.<sup>1</sup>,  
Зеленько А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ», 123242, г. Москва, Большой  
Предтеченский пер., д.11-13, 8(499)795-22-27, [resn@mecom.ru](mailto:resn@mecom.ru)

The paper presents the results of numerical experiments on tuning parameters of NEMO model in the course of its preparation for the assimilation of oceanographic data. The sensitivity of simulation results to the vertical resolution of the model grid and methods of sea ice modelling have been studied.

В докладе представлены результаты численных экспериментов по настройке параметров модели NEMO в ходе ее подготовки к усвоению океанографических данных. Модель NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean) разработана консорциумом европейских учреждений [7] и активно применяется в исследованиях климата и в оперативной океанологии.

Исследовалась чувствительность результатов моделирования к вертикальному разрешению модельной сетки и вариантам моделей, используемых в NEMO, для описания ледовых процессов. В экспериментах использовалась так называемая конфигурация ORCA1 с базовым горизонтальным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ . Расчеты осуществлялись на трехполюсной сетке, имеющей базовое разрешение в средних широтах с уменьшением шага по широте в приэкваториальном поясе до  $1/3^\circ$  ( $\approx 37$  км) непосредственно у экватора, и особым, отличающимся от широтно-долготного, расположением узлов в северной приполярной области (характерный шаг сетки здесь  $\approx 50$  км).

В первой серии экспериментов использовались два варианта сеточной области. В эксперименте, называемом ORCA1\_46L, количество уровней составляло 46, а размерность горизонтальной сетки  $362 \times 292$  узлов. Толщина верхнего слоя около 6 м, нижних слоев (на глубинах свыше 3000 м) – около 250 м. Во втором эксперименте (ORCA1\_75L) с

75-ю уровнями размерность горизонтальной сетки составляет  $362 \times 332$  узлов. Толщина верхнего слоя около 1 м, нижних слоев (на глубинах свыше 3000 м) – около 200 м. В этих экспериментах ледовые процессы для обеих сеток рассчитывались по модели LIM3. За счет некоторого увеличения размерности сетки по широте в ORCA1\_75L достигается уточнение аппроксимации расчетной области у побережья Антарктиды. Обеспечивается также более детальное описание вертикальной структуры за счет увеличения количества расчетных уровней.

Во второй серии экспериментов с конфигурацией ORCA1\_75L изучается зависимость результатов моделирования от способов описания ледовых процессов. Сопоставляются результаты двух численных экспериментов, в которых к океанской модели подключается одна из двух версий ледовой модели LIM2 или LIM3, входящих в программный комплекс NEMO. Основным отличием модели LIM3 [11] от модели LIM2 [1, 10] является введение нескольких градаций толщин льда, для каждой из которых ведется отдельный расчет, а также разные способы параметризации термодинамических процессов, в том числе и описания эффектов солености.

В обеих версиях ледовой модели в расчетных уравнениях, учитывающих наряду с динамическими процессами фазовые переходы превращения снега в лед, воды в лед, льда в воду и некоторые присущие этим средам специфические явления, обеспечивается выполнение балансовых условий на границах атмосфера–снег, атмосфера–лед и лед–вода.

Атмосферные воздействия (граничные условия на поверхности океана) задавались по данным DFS5.2 (DRAKKAR Forcing Set) [5] с 3-часовой дискретностью по времени для метеорологических переменных в приводном слое атмосферы и суточной дискретностью для нисходящих потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, а приток пресной воды с материков – по климатическим данным [2, 3] за каждый из 12 месяцев климатического годового цикла.

Численные эксперименты проводились на интервале времени с января 2001 г. по декабрь 2013 г. с начальными условиями для температуры и солености океана, определяемыми по данным атласа WOA13 [6, 12], а для скоростей течений принималось состояние покоя.

Результаты первой серии экспериментов свидетельствуют, что функция тока атлантической меридиональной циркуляции (АМЦ) в ORCA1\_75L воспроизводится более интенсивной, что лучше согласуется с другими модельными расчетами и имеющимися данными наблюдений. Циркуляционная ячейка Дикона (Deacon cell) также лучше воспроизводится в ORCA1\_75L: в ORCA1\_46L она на несколько граду-

сов ( $>3^\circ$ ) сдвинута к экватору. Это смещение АМЦ приводит к отрицательному (т.е., направленному на юг) меридиональному переносу тепла (МПТ) на  $35^\circ$  ю.ш., что противоречит данным наблюдений [4]. Конфигурация ORCA1\_75L дает большие величины меридионального переноса тепла (МПТ) от экватора до  $\sim 35^\circ$  с.ш., чем ORCA1\_46L. Величина МПТ в низких широтах неплохо согласуется с данными, полученными с помощью моделей с более высоким разрешением.

Повышенное горизонтальное разрешение около побережья Антарктиды в ORCA1\_75L позволяет уменьшить расхождение между модельными полями температуры и солености и WOA13 в море Уэдделла и в море Росса. Таким образом, улучшение разрешения по вертикали способствует более правильному воспроизведению термохалинных процессов в южной Атлантике.

Анализ второй серии экспериментов с ORCA1\_75L показывает, что модель LIM2 несколько точнее воспроизводит распределение сплоченности льда при сравнении ее расчетных значений со спутниковыми наблюдениями [8]. Однако сезонные изменения объема морского льда лучше воспроизводятся моделью LIM3. Эта модель обеспечивает неплохое согласие результатов расчета объема морского льда с данными реанализа GIOMAS (Global Ice–Ocean Modeling and Assimilation System) [9], в то время как объем льда в расчетах по модели LIM2 составляет только  $\sim 65\%$  от величин GIOMAS.

На основе проведенных экспериментов можно сделать вывод о предпочтительности модели LIM3 для дальнейшей работы, так как она приемлемо моделирует сплоченность и точнее воспроизводит объем льдов, представляющий собой интеграл от произведения толщины на сплоченность. Лучшее разрешение по вертикали способствует более адекватному воспроизведению процессов в Южной Атлантике. А более точная аппроксимация расчетной области у побережья Антарктиды в 75-уровневой версии модели позволяет уменьшить расхождение между получаемыми в расчетах термохалинными полями и данными наблюдений, в качестве которых рассматривались данные атласа WOA13.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bouillon S., Morales Maqueda M.A., Legat V., Fichefet T. An elastic-viscous-plastic sea ice model formulated on Arakawa B and C grids // *Ocean Modelling*. 2009. Vol. 27. P.174–184. Doi: 10.1016/j.ocemod.2009.01.004.
2. Dai A., and Trenberth K.E. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations // *J. Hydrometeorol.*, 2002, vol. 3, pp. 660–687.
3. Dai A., Qian T., Trenberth K.E., Milliman J.D. Changes in continental freshwater discharge from 1948–2004 // *J. Climate*, 2009, vol. 22, pp. 2773–2791.

4. Dong S., Goni G., and Bringas F. Temporal variability of the South Atlantic Meridional Overturning Circulation between 20°S and 35°S// *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol.42. P.7655–7662 doi:10.1002/2015 GL065603.
5. Dussin R., Barnier B., Brodeau L., Molines J.-M. The Making of the DRAKKAR Forcing Set DFS5. DRAKKAR/MyOcean Report 01-04-16. April 2016. 34 p. Available at [https://www.drakkar-ocean.eu/publications/reports/report\\_DFS5v3\\_April2016.pdf](https://www.drakkar-ocean.eu/publications/reports/report_DFS5v3_April2016.pdf).
6. Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, C. R. Paver, J. R. Reagan, D. R. Johnson, M. Hamilton, and D. Seidov. *World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature*. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; 2013. NOAA Atlas NESDIS 73, 40 pp.
7. Madec, G. and the NEMO team: Nemo ocean engine – version 3.4, Technical Report ISSN 1288–1619, No. 27, Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, 2012
8. Meier, W., Fetterer, F., Savoie, M., Mallory, S., Duerr, R., and Stroeve, J.: NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 2, National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado, USA, doi:10.7265/N55M63M1, updated 2016, 2013.
9. Schweiger, A., Lindsay, R. W., Zhang, J., Steele, M., Stern, H., and Kwok, R.: Uncertainty in modeled Arctic sea ice volume // *J. Geophys. Res.*, 116, 1–21, doi:10.1029/2011JC007084, 2011.
10. Timmermann, R., Goosse, H., Madec, G., Fichefet, T., Etche, C., Duliège, V. On the representation of high latitude processes in the orca-lim global coupled sea ice ocean model // *Ocean Modelling* 8. 2005. 175–201.
11. Vancoppenolle M., Fichefet T., Goosse H. et al. Simulating the mass balance and salinity of Arctic and Antarctic sea ice. 1. Model description and validation // *Ocean Modelling*. 2009. Vol. 27. P. 33–53. Doi : 10.1016/j.oceamod.2008.10.005.
12. Zweng, M.M, J.R. Reagan, J.I. Antonov, R.A. Locarnini, A.V. Mishonov, T.P. Boyer, H.E. Garcia, O.K. Baranova, D.R. Johnson, D.Seidov, M.M. Biddle, 2013. *World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity*. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 74, 39 pp.