

И. А. Чернов¹, А. В. Толстикова², П. Лаззари³

¹Институт прикладных математических исследований
Карельского научного центра РАН, г.Петрозаводск

²Институт водных проблем Севера

Карельского научного центра РАН, г.Петрозаводск

³Национальный институт океанографии и экспериментальной геофизики,
г.Сгонико, Италия

(Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Sgonico, Italy)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОДУЦЕНТОВ БЕЛОГО МОРЯ

Модель Белого моря *JASMINE* создана на основе модели Северного Ледовитого океана *FEMAO* проф. Н.Г.Яковлева. Блок экосистемы включает итальянскую модель *BFM*. Предварительные результаты показывают адекватное моделирование продуцентов Белого моря, хотя существуют проблемы, связанные с количеством вещества.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моделирование, *JASMINE*, *BFM*, Белое море, экосистема

Белое море – один из самых изученных объектов Мирового океана [1], поэтому может рассматриваться как модельный водоем для решения самых разнообразных проблем, связанных, например, с испытанием нового оборудования, тестированием методик поиска и оценки биоресурсов, методов выращивания марикультуры и рыбозаведения в условиях Субарктики и Арктики.

Существующие базы данных организаций-держателей (Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН, Институт океанологии РАН, Зоологический институт РАН (ЗИН РАН), Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ) и др.), общедоступные электронные ресурсы (Климат морей России, ЕСИМО [2]; совместная база ЗИН РАН и NOAA [3]; программа «Визуализация термохалинных полей...» [4]), новые атласы [5, 6] являются основой для верификации математических моделей по Белому морю. В связи с этим представляется актуальной разработка объединенной модели термогидродинамики и экосистемы Белого моря, более достоверной по сравнению с ранее разработанными системами. Из трехмерных численных моделей Белого моря необходимо упомянуть объединенную трехмерную модель термогидродинамики и экосистемы авторов И.А.Неелова и О.П.Савчука [7], систему оперативного мониторинга Е.В.Семенова [8]), численную трехмерную гидродинамическую модель течений вод Белого моря М.В.Лунева [9], модель Северного Ледовитого океана Н.Г.Яковлева *FEMAO* [10], модифицированную и адаптированную нами для условий Белого моря [11]. Эта версия носит название *JASMINE* [12].

В настоящее время в Институте прикладных математических исследований КарНЦ РАН и ИВПС КарНЦ выполнена работа по объединению модели *JASMINE* [13] и модели экосистемы моря *BFM* [14]. Модель *BFM* [15] позволяет описать динамику скалярных величин в заданной точке. Их мож-

но задать более 50. Предусмотрена возможность объединять обширные группы (например, только автотрофы и гетеротрофы) или, наоборот, дробить сообщества на более мелкие, если есть такая необходимость. Так, например, среди планктонных организмов отдельно можно выделить фито-, зоо-, пико-, бактериопланктон и т.д.

Модель гидродинамики поставляет данные в виде физических условий (температура, соленость, освещенность и т.п.) и выполняет перенос трассеров. Можно учитывать обратное влияние биогеохимических параметров на термодинамику через изменение прозрачности воды. Программный комплекс реализован на современном диалекте языка программирования Фортран и функционирует на кластере КарНЦ (<http://cluster.krc.karelia.ru>) и кластере Института вычислительной математики РАН (www.inm.ras.ru/claster).

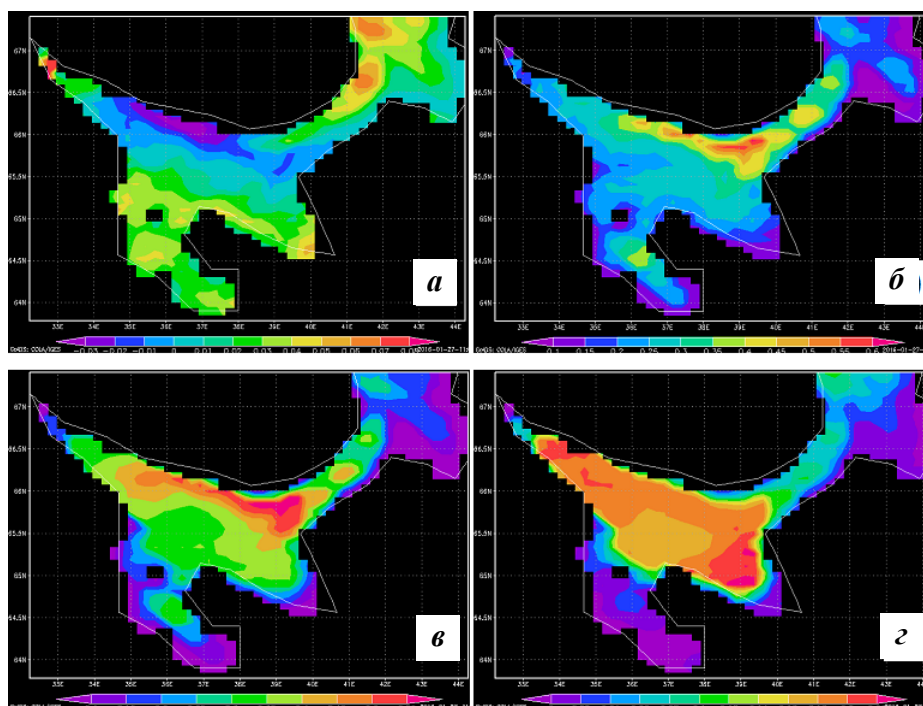
Отметим, что расчет и перенос многочисленных полей трудоемок с вычислительной точки зрения, но хорошо реализуется параллельно, поскольку расчет динамики экосистемных переменных в различных узлах сетки, а также перенос отдельных трассеров независимы.

Входными данными расчетной программы в моделях являются граничные условия на «жидкой границе» Белого и Баренцева морей, метеоданные *NCEP* (<http://www.ncsp.noaa.gov/>), сток рек (Северная Двина, Онега, Мезень, Кемь, Ковда), который реализован в виде пресноводных проливов со среднемесячной температурой пресной воды. Учитываются потоки массы, тепла и соли, биогенных веществ и планктонных организмов. Выходными данными модели являются осредненные за необходимый период времени поля трехмерной скорости течений, термохалинные поля, карты распределения массы льда, двумерной скорости дрейфа льда, снега, сплоченности льда по градиентам толщины и отклонения уровня моря от равновесного. Кроме того, сохраняются биохимические трассеры. Качественное распределение скорости течений, термохалинных полей, толщины льда в целом согласуется с общепринятой картиной для Белого моря [16, 1].

В 2015 г. началась совместная работа с итальянским Институтом океанографии и экспериментальной геофизики (<http://www.ogs.trieste.it/>) по настройке параметров модели *BFM* для условий Белого моря. В настоящее время ведутся работы по моделированию продуцентов Белого моря, получены первые данные. Качественное распределение хлорофилла «а», в целом, соответствует реальной картине его распределения [17, 18]. Так, наибольшие концентрации выражены в вершинах заливов, минимальные – в Горле и северной части Бассейна. Вертикальное распределение также хорошо согласуется с данными измерений [17], и максимум наблюдается до горизонта 20 м, что в Белом море соответствует фотическому слою.

Сейчас моделируется динамика первичной продукции Белого моря (рис.1).

Сезонная модельная динамика развития первичной продукции согласуется с данными из литературных источников [16 – 18]. Так, весной максимальные значения наблюдаются в устьях рек, где повышенное содержание биогенных элементов и более высокая температура воды. В летний период времени проявляется снижение первичной продукции, связанное с истощением запаса биогенных элементов [16], отчетливо это выражено в Онежском заливе. Осенью максимум отмечается в центральной части моря. Хорошо заметно, что Двинский залив отличается большей продуктивностью.



Р и с . 1 . Первичная продукция Белого моря в мае (а), июле (б), сентябре (в), ноябре (г) соответственно. Среднеголетние данные, $\text{мг С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$.

Таким образом, с помощью комплекса *JASMINE* + *BFM* можно получать согласованные данные по термогидродинамике и биогеохимическим параметрам Белого моря, количественно выражать потоки вещества на «жидкой границе» и между отдельными районами моря.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» по теме «Оценка влияния изменений климата и антропогенных факторов на экосистему и биоресурсы Белого моря и водосбор».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов* / Под ред. Н.Н.Филатова, А.Ю.Тержевика. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007.– 335 с.
2. *Климат морей России и ключевых районов Мирового океан. Электронный атлас Единой системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО)*. ВНИИГМИ МЦД. – Обнинск. Режим доступа: <http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/index.html>
3. *Berger V.Ja., Naumov A.D., Usov N.V., Zubaha M.A., Smolyar I., Tatusko R., Levitus S.* 36-year time series (1963-1998) of zooplankton, temperature and salinity in the White Sea.– St.-Petersburg, 2003. – 362 p. Режим доступа: http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WH_SEA/WWW/HTML/atlas.html.
4. *Чернов И.А., Толстиков А.В.* Визуализация и сравнение результатов моделирования термохалинных и гидродинамических полей Белого моря // Свид. об

офици. рег. программ для ЭВМ № 2014618474. 21 августа 2014 г. Режим доступа: <http://nwpi.krc.karelia.ru/whsea/>

5. Филатов Н.Н., Толстиков А.В., Богданова М.С., Литвиненко А.В., Мениуткин В.В. Создание информационной системы и электронного атласа по состоянию и использованию ресурсов Белого моря и его водосбора // Арктика: экология и экономика.– 2014.– № 3 (15).– С.18-29.
6. Богданова М.С., Толстиков А.В. Разработка оригинал-макета печатной версии атласа «Белое море и его водосбор» // Современные научные исследования и инновации.– 2015.– № 12. <http://web.snauka.ru/issues/2015/12/60977>.
7. Neelov I.A., Savchuk O.P. 3-D IO RAS-AARI Coupled hydrodynamic-biogeochemical model of the White Sea (Final report of INCO-Copernicus Project "WHITE SEA" No. ICA2-CT-2000-10014: «Sustainable management of the marine ecosystem and living resources of the White Sea».– 2003.– 220 p.
8. Семенов Е.В. Численное моделирование динамики Белого моря и проблема мониторинга // Изв. РАН. ФАО.– 2004.– т.40, № 1.– С.128-141.
9. Лунева М.В. Исследование динамики вод Белого моря на основе численного моделирования: Автореф. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук.– М., 1998.– 23 с.
10. Яковлев Н.Г. Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948-2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // Изв. РАН. ФАО.– 2009.– т.45, № 3.– С.1-16.
11. Chernov I. Numerical modelling of large-scale dynamics of the White Sea // Universal Journal of Geoscience.– 2013.– v.1(3).– P.150-153.
12. Моделируем Белое море. Режим доступа: <https://sites.google.com/site/modellingthewhitesea/>
13. Чернов И.А., Толстиков А.В. Численное моделирование крупномасштабной динамики Белого моря // Труды КарНЦ РАН. Серия «Математическое моделирование и информационные технологии».– Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014.– № 4.– С.137-142.
14. Chernov I., Tolstikov A. Sensitivity of the coupled model of the White Sea dynamics and biochemistry // 10th International Scientific and Practical Conference «Environment. Technology. Resources». June 18-20. Rezekne. Latvia.– 2015.– P.82-84.
15. Biogeochemical Flux Model (BFM). Режим доступа: <http://bfm-community.eu>.
16. Белое море. Справочник «Проект “Моря СССР”». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. – т. II, вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биопродуктивности.– Л.: Гидрометеоиздат, 1991.– 196 с.
17. Бергер В.Я. Продукционный потенциал Белого моря. Исследования фауны морей.– СПб: ЗИН РАН, 2007.– т.60 (68).– 292 с.
18. Кравчишина М.Д. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав.– М.: Научный мир, 2009.– 264 с.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.

I.A.Chernov, A.V.Tolstikov, P.Lazzari

MODELING OF THE DYNAMICS OF PRODUCERS OF THE WHITE SEA

The JASMINE model of the White Sea based on the prof. N.G.Iakovlev's model of the Arctic Ocean (FEMAO). The ecosystem block uses the italian BFM model. Preliminary results indicate reasonable mathematical modelling of producers of the White Sea. However, there are problems connected with quantity of matter.

KEYWORDS: *modeling, JASMINE, BFM, the White Sea, ecosystem*