

УДК 551.465.45

О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ БЕЛОГО МОРЯ

И. А. Чернов¹, А. В. Толстикова²

¹ Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

² Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия

Рассматривается опыт трехмерного численного моделирования термогидродинамических и биогеохимических процессов в Белом море при сотрудничестве нескольких институтов РАН и зарубежных коллег. Комплексная модель водоема JASMINE, основанная на модели Северного Ледовитого океана FEMAO, воспроизводит динамику вод и льда. Также модель включает в себя блок пелагических биогеохимических процессов BFM, который способен описывать потоки вещества между скалярными полями, соответствующими группам организмов или органическому и неорганическому веществу различных форм и фракций. Реализован обмен веществом и энергией с донными отложениями и морским льдом, имеется и блок экосистемы морского льда BFMSI. Возможен расчет переноса пассивных примесей произвольной природы. Изложена история развития модели, повышение пространственного разрешения, преодоленные сложности и нерешенные пока проблемы. Обсуждается проблема граничных значений и возможность каскадного расчета, при котором грубые модели более крупных водоемов поставляют граничные данные более точным региональным моделям. В частности, уже реализовано взаимодействие между моделью Земной системы ИВМ РАН и JASMINE на кластере ИВМ РАН. Затронута системная проблема разработки сложных вычислительных систем в области наук о Земле: отсутствие документации и сообщества, а также зависимость проекта от работоспособности одного человека – автора модели. Описан прототип системы усвоения данных для модели, позволяющей корректировать фазовое состояние по данным наблюдений, в том числе станционных. Продемонстрированы возможности проведения численных экспериментов: перенос пассивной примеси с дельтаобразным начальным распределением, отклика моря на изменения климата, в частности на вариации речного стока, и другие применения модели для достижения более полного понимания процессов в Белом море.

Ключевые слова: численное моделирование; морские экосистемы; Белое море; биохимия льда; JASMINE.

I. A. Chernov, A. V. Tolstikova. ON NUMERICAL SIMULATION OF THE WHITE SEA

We describe our experience of three-dimensional numerical simulation of thermohydrodynamic and biogeochemical processes in the White Sea in collaboration with several institutes of the Russian Academy of Sciences and foreign colleagues. The comprehensive model of the White Sea, called JASMINE, is based on the FEMAO model of the Arctic Ocean. It reproduces the dynamics of sea water and ice and includes, i. a., a pelagic bio-

geochemical submodel BFM, which is able to describe fluxes of matter between scalar fields corresponding to groups of organisms or organic and inorganic matter of various forms and fractions. Matter and energy exchange with bottom sediments and sea ice has also been modeled, and the model includes a sea-ice ecology block BFMSI. Besides, it is possible to simulate contamination transport for tracers of arbitrary origin. We relate the history of developing the model, tell how the spatial resolution was increased, describe the resolved and yet unresolved problems. The problem of boundary values is discussed, as well as the possibility of a cascade simulation, where coarser models of larger objects provide data for more precise regional models. As an example, we introduce the already implemented interaction between the INM RAS model of the Earth system and JASMINE on INM RAS cluster. We touch upon the systemic problem of the development of complex computing systems in the field of Earth sciences, i. e. the lack of documentation and community, and the fact that the project depends on the availability of a single person: the author of the model. A prototype of a data assimilation system for the model is described: it allows correcting the phase state according to observational data (such as station data). The possibilities of carrying out numerical experiments are demonstrated: the transfer of a passive tracer with a delta-shaped initial distribution, the response of the sea to climate change and, in particular, to variations in river runoff, and other applications of the model to achieve a better understanding of the processes in the White Sea.

Key words: numerical modeling; marine ecosystems; the White Sea; ice biochemistry; JASMINE.

Введение

Современные численные модели и высокопроизводительные вычислительные устройства позволяют моделировать сложные природные объекты с высокой точностью. По существу, рост разрешения сдерживает уже не столько вычислительная сложность, сколько ограничения снизу на шаг сетки, связанные с лежащими в основе модели предположениями и описанием подсеточных процессов. Так, если лед описан в модели как ансамбль льдин и вычисляются статистические характеристики этого ансамбля, то в ячейке сетки должно быть много льдин; в связи с этим характерный размер льдины является ограничением на шаг сетки. В ряде случаев модель сохраняет работоспособность при формальном нарушении предположений: например, колебания уровня Белого моря могут превышать несколько метров, тогда как при шаге вертикальной сетки в 2,5 метра модель работоспособна.

Методы численного моделирования для небольших мелководных морей со льдом имеют свои особенности, раскрытые, например, в коллективной монографии [Саркисян и др., 2005]. Активное использование их началось, по-видимому, в 1990-х годах [Дианов и др., 1990; Доронин, 1990]. Несмотря на бурное развитие гидродинамических моделей самого разного уровня в мире, для Белого моря их существует совсем немного. Помимо развиваемой авторами модели JASMINE [Чернов и др., 2016; Chernov et al., 2018], являющейся адаптирован-

ной для условий Белого моря ответвлением модели Северного Ледовитого океана FEMAO Н. Г. Яковлева (ИВМ РАН) [Яковлев, 2012] и ныне не поддерживаемой модели И. А. Нелова [Zdrovennov et al., 2005; Белое..., 2007], известна модель оперативного мониторинга Е. В. Семенова [Родионов и др., 2012], см. также [Саркисян и др., 2005; Белое..., 2007]. Она приспособлена для краткосрочных прогнозов (от нескольких суток до недель), не описывает морской лед и рассматривает не все Белое море, проводя границу модельной области в районе моря, называемом Горло (это узкий мелководный пролив, отделяющий центральную часть моря, известную как Бассейн, и крупные заливы от северо-восточной части, к которой относятся Воронка и Мезенский залив).

Существующие модели, доступные под свободной лицензией (такие, как POM¹), применяются для моделирования частей Белого моря (например, [Ионов и др., 2015]).

Стоит отметить, что значительный прогресс вычислительных методов и технологий достигнут не только в области собственно вычислений, приложений и аппаратной базы, но и в методологии разработки вычислительных комплексов. Несомненно, впечатляющий рост производительности процессоров, числа процессоров в многопроцессорных компьютерах и количества ядер на одном процессоре, объема доступной оперативной и дисковой памяти и повышение доступности вычислительных

¹ <http://www.ccpo.odu.edu/POMWEB/>

ресурсов сыграли основную роль. Разработка и стандартизация интерфейса MPI¹, регламентирующего обмен сообщениями между вычислительными устройствами с разделенной памятью, упростили перенос вычислительных комплексов с устройства на устройство.

Тем не менее важно и развитие языка Fortran: регулярно публикуются обновления Стандарта (последний, по-видимому, стандарт ISO/IEC 1539-1:2018, известный как Fortran-2018, выпущен в ноябре 2018 г.). Начиная с версии стандарта Fortran-2003 язык поддерживает объектно-ориентированную парадигму, а в Fortran-2008 включена технология комассивов, позволяющая прозрачно организовывать межпроцессорное взаимодействие. Компиляторы Intel и GNU реализуют стандарт достаточно полно. Однако прогресс в этой области часто игнорируется, вплоть до применения устаревших конструкций стандарта Fortran-77, препятствующих эффективной оптимизации кода.

Следует учитывать и развитие технологий программирования. Системы контроля версий, облачные сервисы для совместной работы, инструменты и регламент написания документации – все это стало необходимостью при разработке сложных программных систем, но зачастую не используется в сфере вычислительной гидродинамики. Это приводит к ситуациям, при которых код, по существу, вынужденно поддерживается одним человеком – его автором. Упомянутая выше модель Белого моря И. А. Неелова после его ухода из жизни перестала поддерживаться и, по сути, более не существует. С другой стороны, ряд европейских и американских моделей (BFM, WRF, POM, NEMO и др.) либо поддерживаются сообществом под открытой лицензией, либо развиваются коллективом авторов и снабжены детальной документацией.

Здесь немаловажно, что техническая документация, руководства и справочники по программным средствам не считаются научными работами и мало добавляют к показателям научного сотрудника, в связи с чем отсутствует стимул разрабатывать эти материалы.

Целью настоящей статьи является представление модели Белого моря JASMINE в исторической перспективе, с описанием возможностей модели. Подобные проекты критически зависят от взаимодействия специалистов различных профилей, сотрудников различных организаций и от международного сотрудничества.

Белое море и его характеристики

Белое море представляет значительный интерес для ученых. В монографиях [Zdorovenkov et al., 2005; Белое..., 2007] подведены итоги междисциплинарных исследований Белого моря, но уже более 10 лет подобных изданий в свет не выходило. С вычислительной точки зрения Белое море – относительно небольшой мелководный водоем со сложной береговой линией. Сильные колебания уровня моря, связанные с приливными движениями, приводят к высоким скоростям течений и высокому уровню доступной потенциальной энергии. Это накладывает сильные ограничения на шаг по времени в связи с условием Куранта: шаги пространственной (как горизонтальной, так и вертикальной) сетки малы, а скорости могут быть велики. Условия в заливах весьма различны: одни активно обмениваются веществом и энергией с соседними районами, другие нет; резко отличаются глубины в заливах, а также играют важную роль впадающие в них реки. Соленость Белого моря ниже, чем в соседнем Баренцевом, что связано с сильным речным стоком. Она же ответственна за стратификацию, которую сложно воспроизвести в модели (активное перемешивание за счет приливной динамики).

Для Белого моря накоплено много данных измерений, в основном *in situ* (с борта корабля или близ берега). Использование спутниковых данных ограничено: регион большую часть года покрыт облаками (что, впрочем, характерно для всего Севера), а региональные алгоритмы не всегда достаточно точны, особенно когда речь идет о биогеохимических данных (концентрации хлорофилла *a*, например). Автономные буи и другие автоматы, насколько нам известно, пока широко не используются, что часто связано с государственными ограничениями по их применению в Белом море. Обзор коллекций данных, доступных для Белого моря, а также регламент доступа к ним и наличествующих проблем дан нами в работе [Chernov, Tolstikov, 2020].

Как уже отмечалось, разработка и поддержка численной модели моря невозможна без сотрудничества специалистов разных профилей: для расчетов необходимы данные, результаты нужно верифицировать, различные компоненты модели разрабатываются разными авторами и коллективами. Удалось наладить взаимодействие и эффективные плодотворные связи между ИПМИ КарНЦ РАН, ИВПС КарНЦ РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова (биологический факультет), ИВМ РАН (г. Москва), ИО РАН (г. Мо-

¹ <https://www.mpi-forum.org/docs/>

сква), ЗИН РАН (Беломорская биологическая станция, мыс Картеш), OGS (г. Триест, Италия), а также SYKE (Хельсинки, Финляндия).

История версий

Первая версия модели функционировала на кластере КарНЦ РАН с 2011 г. Была адаптирована для Белого моря модель FEMAO (ИВМ РАН) [Яковлев, 2012] Северного Ледовитого океана. Имеются существенные геофизические различия между водоемами, так что простой перенос модели на другой водоем невозможен. Прежде всего это прилив, который доминирует в Белом море и существенно менее выражен в Арктике. Горизонтальная сетка регулярная и насчитывает 50 узлов в каждом направлении, вертикальная неравномерна и содержит 16 горизонтов. Наиболее затратны с вычислительной точки зрения процедуры расчета адвективного переноса, которые выполняются параллельно.

Численные эксперименты подтвердили слабую зависимость динамики от начального распределения: важны интегральные показатели (теплота и соль), а распределение быстро возвращается к аттрактору, обусловленному приливной динамикой и ветром.

Задание среднесезонных данных по температуре и солености вод в окрестности границы Белого и Баренцева морей и стока рек, а также характеристик атмосферы из данных реанализа NOAA/NCEP¹ позволило удовлетворительно воспроизвести характеристики поверхности Белого моря и верхнего слоя вод. Относительно глубоководная часть моря невелика и также воспроизводится, однако перемешивание в модели все еще завышено, так что динамика температуры и солености у дна в «яме» на границе Бассейна и Кандалакшского залива выше, чем в реальности.

Предпринята попытка реализовать систему усвоения данных наблюдений при помощи ансамблевого фильтра Калмана² [Sakov et al., 2010]. Основной задачей было организовать расчет нескольких копий вычислительной системы (ансамбля) с синхронизацией один раз в модельные сутки для расчета поправок по полученному ансамблю состояний моря и доступным наблюдениям. Система подтвердила работоспособность, корректируя невязку рассчитанных и «наблюдаемых» в нескольких точках (станциях) характеристик. Рассматриваемой характеристикой являлась темпера-

тура поверхности моря. К сожалению, проект РФФИ не поддержан, и усилия были направлены на модель экосистемы моря.

Модель пелагической экосистемы BFM³ была сопряжена в online-режиме (то есть модели взаимодействуют на каждом шаге времени) с моделью динамики Белого моря [Chernov et al., 2018] в 2015 г. Комплекс получил наименование JASMINE и способность воспроизводить динамику хлорофилла *a*, биомасс различных классов фито- и зоопланктона, первичную продукцию и ряд других биогеохимических концентраций.

Стоит отметить, что расчет биогеохимических процессов чрезвычайно затратен вычислительно. Модель моря передает BFM состояние в ячейке и получает производные фазового вектора экосистемной модели и скорости гравитационного осаждения ряда компонент, а затем обновленные биогеохимические поля (их 50) адвективно переносятся течениями. Таким образом, число вызовов процедуры расчета адвекции возрастает в двадцать шесть раз.

Важно, что есть возможность применить технику расщепления по процессам. Так, на шаге по времени необходимо рассчитать изменения ряда полей: термохалинных, скорости, биогеохимических концентраций и т. п. Изменения эти связаны с различными процессами, которые можно рассчитывать по отдельности. Так, биогеохимические концентрации меняются в силу: биологических процессов (поедание, дыхание, фотосинтез и т. п.), которые моделирует BFM «здесь и сейчас», без взаимодействия между ячейками; гравитационного осаждения, которое изменяет концентрации в столбе воды, но без взаимодействия по горизонтали и без потоков вещества внутри экосистемы; переноса течениями, в ходе которого поля между собой не взаимодействуют, но каждое изменяется во всех трех измерениях.

Это позволило расширить схему распараллеливания (расчета независимых друг от друга величин): доступные процессоры параллельно рассчитывали адвективный перенос всех полей, а также динамику биогеохимических взаимодействий в ячейках сетки. В результате удалось существенно ускорить расчеты, что дало возможность уже воспроизводить динамику совместной системы «море – лед – экосистема» за несколько лет (межгодовая изменчивость) за время от суток до недели.

Обмен веществом и энергией между пелагиалью и донными отложениями особенно важен в Белом море в связи с его мелководностью.

¹ <https://psl.noaa.gov/data>

² <https://enkf.nersc.no/>

³ <http://bfm-community.eu>

Масштаб скорости осаждения ряда компонент (детрит и некоторые виды фитопланктона) составляет несколько метров в сутки, а период полуразложения – от нескольких недель до года. Таким образом, при глубине около километра время достижения дна сравнимо с временем разложения или даже превосходит его. В Белом море же глубина не превышает 350 метров, а на большей части акватории она существенно меньше (в среднем по морю немного более 65 м). В этой связи адекватнее учесть реминерализацию органического вещества бентосной экосистемой.

Существует несколько моделей, описывающих процессы в толще донных отложений [Mussap, Zavatarelli, 2017]. Была выбрана простая модель полуразложения с разделением вещества на медленную и быструю фракции с различным периодом, зависящим от температуры [Soetaert et al., 2000]. Затем добавлена модель экосистемы морского льда (входит в новую версию BFM 5.2). Морской лед содержит полости, каналы, заполненные водой с повышенной концентрацией соли и населенные приспособленными к таким условиям организмами. При таянии льда биогенное вещество и органические останки обогащают верхний продуктивный слой, ускоряя начало весеннего цикла.

Далее была разработана параллельная версия программного комплекса, основанная на библиотеке обменов П. Пережогина [Perzhogin et al., 2021]. Она позволяет разбить двумерную расчетную область на части, назначаемые различным процессорам с учетом балансировки нагрузки, и прозрачно осуществляет обмен между ними (рис. 1). Таким образом, параллелизм по процессам заменен параллелизмом по области. Балансировка нагрузки важна, поскольку Белое море неоднородно по глубине: узел двумерной сетки с большой глубиной более трудоемок, чем узел с малой глубиной, так как он требует расчета большего числа узлов по вертикали.

Данная разработка позволила увеличить разрешение модели до 3 км и в перспективе – до 1 км. Основная рабочая версия на сегодня – трехкилометровая, с шагом по времени 6 минут.

Дополнительно разработаны два модуля: для расчета динамики пассивной примеси произвольной природы и для расчета водообмена. Водообмен считается интегрированием дивергенции скорости по выбранной области. В целом подтверждаются известные постулаты о балансе между испарением и осадками (поток воды через поверхность моря мал) и об эф-

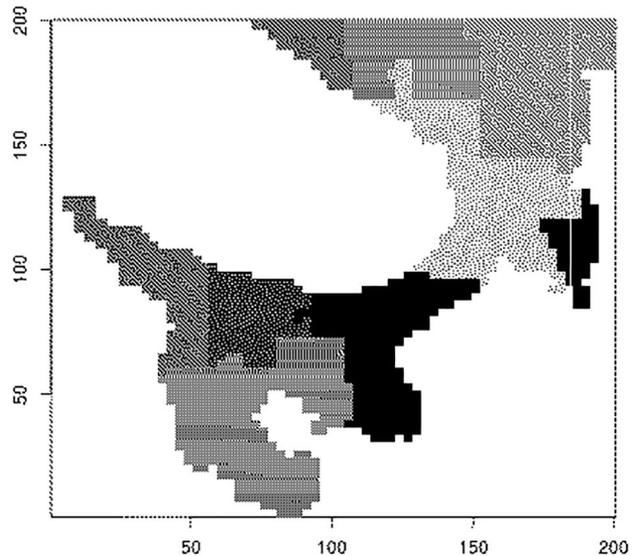


Рис. 1. Распределение узлов сетки по 64 процессорам
Fig. 1. Distribution of grid nodes over 64 CPU

фективном водообмене с Баренцевым морем в $200 \text{ км}^3/\text{год}$ (в пользу вытекания).

Граничные значения

Для работы модели необходимы граничные значения. Белое море обладает одной «жидкой границей» (с Баренцевым морем), на которой задаются уровень моря (приливные колебания), значения температуры и солёности воды и значения всех биогеохимических концентраций. Отметим, что, согласно условию Флезера, втекающая вода имеет указанные характеристики, а вытекающая – расчетные в приграничных узлах сетки. В устьях рек задаются температура воды и значения биогеохимических концентраций. Данные получены ИВПС КарНЦ РАН [Chernov, Tolstikov, 2020].

На поверхности моря следует задавать поток солнечной радиации, характеристики приводного слоя воздуха (температуру, давление, влажность), осадки и вектор скорости ветра. Шестичасовые значения доступны в открытом реанализе NOAA/NCEP¹. Поток вещества и энергии через поверхность моря связан с осадками и их температурой, которые надо задавать, а также с испарением и связанным с ним потоком тепла, которые вычисляются в модели. Поток соли из атмосферы равен нулю, как и в реках. Поток биогенного вещества задается равным нулю, но в ряде случаев может отличаться от нуля, если лимитирую-

¹ <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html>

щее биогенное вещество поступает, например, с терригенной пылью.

Граничные значения на дне не задаются, однако поток неорганического вещества на дне не равен нулю и связан с реминерализацией органических останков в донных отложениях. Инициализация аккумуляторов вещества является отдельной задачей. Изначально выбрано условие нулевого эффективного потока вещества: поток неорганики на дне полагался равным потоку органики, падающей на дно. После длительного расчета (на 10 лет) получены начальные значения всех полей, в том числе описывающих состояние бентосной экосистемы.

Имеется вариант модели, способный интерполировать на жидкую границу результаты расчетов модели Земной системы INMCM [Саркисян и др., 2005; Володин и др., 2016]. Ведется работа по созданию совместной региональной модели моря и атмосферы.

Применение модели

Результаты численного моделирования с помощью программного комплекса JASMINE применяются в ИВПС КарНЦ РАН при работе по темам госзадания и выполнения грантов, связанных с изучением Белого моря. Удалось добиться удовлетворительного воспроизведения температуры и солёности поверхностного слоя моря и толщины и сплоченности морского льда: как качественно, так и количественно (рис. 2).

За несколько лет совместной работы проведены эксперименты по распространению примеси различной природы в заливах Белого моря, тепловому стоку рек водосбора, модификации температуры приповерхностного слоя воздуха над акваторией моря, рассмотрены сценарии потепления и похолодания, анализировались даты образования и разрушения ледяного покрова, оценивался водообмен между районами Белого моря и с Баренцевым морем, решались вопросы типизации акватории моря по особенностям проявлений внутрисезонных процессов.

Рассматривались четыре сценария изменений теплового стока за период 2000–2011 гг.: увеличение устьевой среднемесячной температуры одной из трех основных рек водосбора Белого моря (Северная Двина, Онега, Мезень) на 2 °С; снижение устьевой температуры одной из этих рек на 2 °С (но не менее, чем до 0 °С); увеличение/снижение годового водного стока тех же рек на 30 %. Всего 13 численных экспериментов.

Анализ модельных сценариев показал, что и потепление, и похолодание в первую очередь сказываются на изменчивости весенней и летней температуры поверхностного слоя воды в заливах, нет заметного смещения дат перехода через маркерные значения (0,2°; -0,5° и -1°С) температуры в поверхностном слое и толще заливов Белого моря. Эти смещения не превосходят нескольких часов.

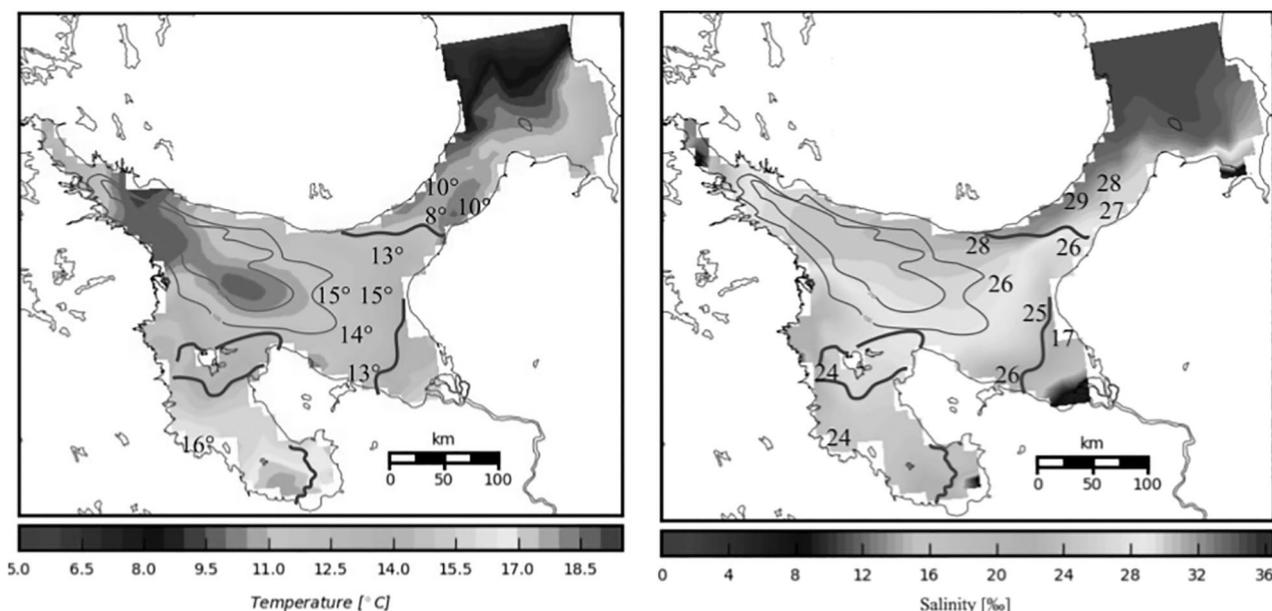


Рис. 2. Температура (слева) и солёность (справа) поверхности моря, август 2013. Числами подписаны экспедиционные измерения

Fig. 2. Temperature (left) and salinity (right) of the sea surface, August 2013. Ship measurements are shown with the numbers

Перенос примеси

Моделирование переноса пассивной примеси является актуальной задачей в связи с проблемами экологической безопасности. Натурные эксперименты не всегда возможны, дороги, а кроме того, сложно разделить, например, влияние приливной динамики и ветровых течений.

С точки зрения модели, примесь может быть поверхностной и трехмерной. Первая соответствует плавающему на поверхности веществу (нефть, некоторые виды пластика), и ее динамика описывается аналогично дрейфу льда. Существенно, например, что втекание воды в залив не изменяет концентрацию такой примеси. Трехмерная примесь распределена в толще и описывается аналогично солёности или биогеохимическим концентрациям, и для нее необходимы граничные значения на жидкой границе и в устьях рек. Помимо примеси с нулевой плавучестью возможна тяжелая примесь, аналогичная компонентам детрита, которая гравитационно осаждается, и примесь с заданной плотностью: она может тонуть, всплывать или менять свое поведение в зависимости от температуры и солёности воды. На практике мы рассчитывали только динамику плавучей примеси и трехмерной примеси с нулевой плавучестью (рис. 3 и 4).

В модели несложно учесть собственную изменчивость концентрации примеси: за счет химических, биологических или физических процессов, а также деятельность источников.

Отдельной проблемой является задание граничных условий. Для трехмерной примеси следует задать концентрацию на жидкой границе: именно она попадает в море при затопке воды. Мы использовали нулевое значение, предполагая, что вынесенное в Баренцево море вещество там сразу рассеивается. Это адекватно для расчета динамики примеси, которая изначально сосредоточена далеко от границы. Кроме того, вытекание воды доминирует над втеканием благодаря стоку рек.

По переносу плавучей примеси получены следующие результаты. За три года рассматривалось пять модельных полей примеси (шаг по горизонтали ~ 3 км); четыре изначально сосредоточены в одном узле сетки – в вершинах Онежского, Двинского, Кандалакшского и Мезенского заливов, а пятое поле изначально равномерно распределено по акватории моря. В эталонном расчете (2000–2002 гг.) ветер брался из данных реанализа NCEP/NCAR, а полусуточный прилив задавался как гармоническое колебание внешнего уровня моря на жид-

кой границе. Два других расчета отличались отсутствием либо прилива, либо ветра.

Результаты показывают, что ветер оказывает более существенное влияние на перенос плавучей примеси, хотя роли прилива и ветра сравнимы.

Заливы имеют разную специфику. Онежский залив наиболее долго очищается от примеси (за три года средняя концентрация снижается всего в три раза), причем прилив препятствует выносу вещества: без прилива (но с ветром) концентрация снижается (за три года) более чем в 20 раз, а без ветра (но с приливом) практически не снижается. Вещество из других заливов, попадающее в Онежский, также надолго задерживается там. Без ветра концентрация вещества из Двинского и Кандалакшского заливов и равномерного поля монотонно растет в Онежском заливе в течение трех лет.

Перспективы развития модели

В настоящее время развитие модели идет по трем направлениям. С одной стороны, продолжают уточняться параметризации и численное описание основных процессов с целью улучшенного воспроизведения динамики вод, льда и биогеохимических показателей Белого моря. В частности, мы стремимся добиться достаточно быстрого расчета модели с пространственным разрешением в 1 км. В настоящее время расчет, с шагом по времени 1 минута, требует большого числа процессоров. Калибруется модель Онежской губы: этот мелководный залив допускает расчет с шагом в 1 км при тех же вычислительных затратах, что и все море с шагом в 3 км.

Желательно, чтобы перемешивание в глубоких слоях было меньше, поскольку температура и солёность в «яме» на границе Кандалакшского залива и Бассейна практически неизменны в течение года. Завышенное перемешивание демонстрируют большинство моделей моря, однако проблему нужно решать. Также, хотя динамика концентрации хлорофилла *a* и биомассы фитопланктона соответствует наблюдениям, предпочтительно сравнить отдельные группы фитопланктона (диатомовые водоросли, крупный фитопланктон, сине-зеленые водоросли и т. п.) и зоопланктон (также по группам).

Второе направление – это повышение автономности модели и возможность прогнозных расчетов. Ведется работа по совместному расчету модели моря и модели динамики атмосферы, которая могла бы поставлять «прогноз погоды» по данным на границе области. Сюда

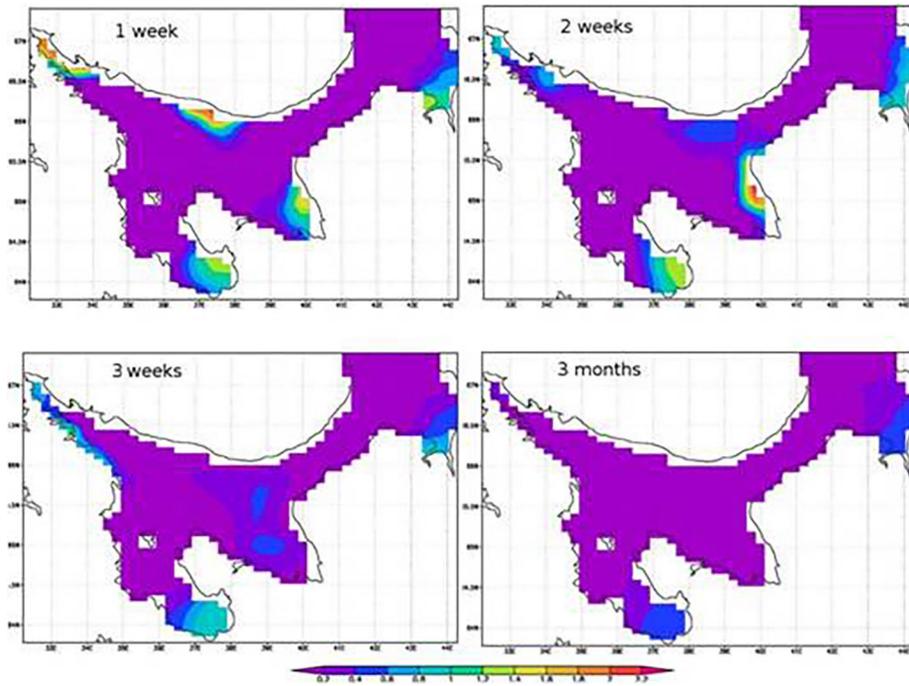


Рис. 3. Динамика плавучей пассивной примеси: за одну, две, три недели и три месяца. Видна «ловушка» в Онежском заливе

Fig. 3. Dynamics of a floating passive tracer: after one week, two weeks, three weeks, and three months

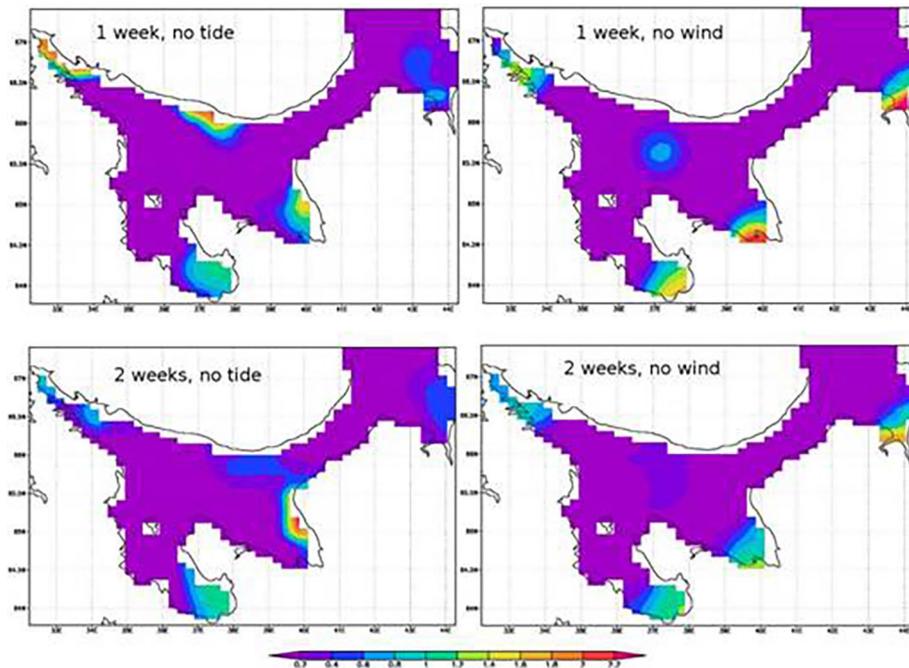


Рис. 4. Динамика плавучей пассивной примеси в численном эксперименте: без ветра и без прилива

Fig. 4. Dynamics of a floating passive tracer in the experiments with no wind and no tide

же относится оптика моря [Lazzari et al., 2021]. Солнечная радиация распространяется в воде сложным образом, разделяясь на прямую и рассеянную вниз и вверх. На оптику влияет

прозрачность воды, определяемая концентрацией терригенного абиотического вещества и биогеохимическими концентрациями, прежде всего хлорофилла, причем волны разных

длин поглощаются и рассеиваются по-разному. Поэтому желательно взаимодействие модели динамики моря, модели экосистемы и оптической модели, способной описывать освещенность в данной точке моря светом с данной длиной волны.

Третье направление: экология морского льда [Tedesco, Vichi, 2014]. Эта перспективная тема лимитируется отсутствием данных регулярных наблюдений. Получение данных по концентрациям в нижнем слое плавучего льда в открытом море затруднительно, однако данные по концентрации биогенных элементов, структуре криосообществ, наличию взвеси и другим биогеохимическим показателям в припайном льду могут быть получены. Исследования льда на предмет изучения в нем живых организмов ранее проводились в Белом море и выполняются в настоящее время несколькими организациями. Например, ИО РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, ЗИН РАН и другими. Тем не менее в силу сложности организации подобных экспедиций эти работы эпизодические, выполняются на локальных участках акватории (в частности, на биологических станциях в Канда-лакшском заливе, устьевых областях крупных рек). Стоит отметить, что данных по пространственному распределению и структуре криосообществ в Белом море для верификации этого блока модели все еще очень мало.

Таким образом, наличие такой модели, как JASMINE (многофункциональной и поддерживаемой в настоящее время), позволяет решать многие теоретические и практические задачи, связанные с изучением Белого моря, дополняя данные, получаемые в экспедициях и при дистанционном зондировании Земли из космоса.

Авторы выражают искреннюю благодарность Н. Н. Филатову, Н. Г. Яковлеву, Д. М. Мартыновой, М. Д. Кравчишиной, Е. М. Володину, Л. В. Ильяш, Т. А. Белевич, А. Ю. Тержевику, P. Lazzari, L. Tedesco, M. Vichi и другим коллегам, в сотрудничестве с которыми достигнуты полученные результаты.

Работа выполнена в рамках госзадания КарНЦ РАН (Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН) и частично поддержана грантом РФФИ 18-05-60184 Арктика.

Литература

Белое море и его водосбор под влиянием климатических и природных факторов / Под ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Тержевика. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 349 с.

Володин Е. М., Галин В. Я., Грицун А. С., Гусев А. В., Дианский Н. А., Дымников В. П., Ибраев Р. А., Калмыков В. В., Кострыкин С. В., Кулямин Д. В., Лыко-сов В. Н., Мортиков Е. В., Рыбак О. О., Толстых М. А., Фадеев Р. Ю., Чернов И. А., Шашкин В. В., Яков-лев Н. Г. Математическое моделирование Земной системы: кол. моногр. / Под ред. Н. Г. Яковлева. М.: МАКС Пресс, 2016. 328 с.

Дианов М. Б., Котов С. В., Некрасов А. В., Бояринов П. М., Петров М. П. Результаты гидродинамического моделирования полусуточных приливов в Белом море // Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1990.

Доронин Ю. П. Моделирование гидрологических процессов шельфового моря // Гидрометеорология – научно-техническому прогрессу: Сб. науч. тр. Л.: ЛГИ, 1990. С. 134–146.

Ионов В. В., Май Р. И., Смагин Р. Е. Численная гидродинамическая модель приливных явлений в губе Кереть (Кандалакшский залив, Белое море) // Известия РГО. 2015. Т. 147, вып. 2. С. 22–37.

Родионов А. А., Семенов Е. В., Зимин А. В. Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 2. С. 89–108.

Саркисян А. С., Залесный В. Б., Дианский Н. А., Ибраев Р. А., Кузин В. И., Мошонкин С. Н., Семенов Е. В., Тамсалу Р., Яковлев Н. Г. Математические модели циркуляции океанов и морей // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т. 2. Математическое моделирование. М.: Наука, 2005. С. 174–278.

Чернов И. А., Толстиков А. В., Яковлев Н. Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 8. С. 116–128. doi: 10.17076/mat397

Яковлев Н. Г. О восприятии полей температуры и солености Северного Ледовитого океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 100–116. doi: 10.1134/S0001433812010136

Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study // J. Marine Syst. 2018. Vol. 187. P. 23–35. doi: 10.1016/j.jmarsys.2018.06.006

Chernov I., Tolstikov A. The White Sea: available data and numerical models // Geosciences. 2020. Vol. 10, iss. 11. Art. 463. doi: 10.3390/geosciences10110463

Lazzari P., Álvarez E., Terzi E., Cossarini G., Chernov I., D'Ortenzio F., Organelli E. CDOM Spatiotemporal variability in the Mediterranean Sea: a modelling study // J. Marine Sci. Eng. 2021. Vol. 9, no. 176. P. 1–18. doi: 10.3390/jse9020176

Mussap G., Zavatarelli M. A numerical study of the benthic pelagic coupling in a shallow shelf sea (gulf of Trieste) // Regional Studies in Marine Science. 2017. Vol. 9. P. 24–34. doi: 10.1016/j.rsma.2016.11.002

Perezhogin P., Chernov I., Iakovlev N. Advanced parallel implementation of the coupled ocean – ice model FEMAO (version 2.0) with load balancing // Geosci.

Model Dev. 2021. Vol. 14. P. 843–857. doi: 10.5194/gmd-14-843-2021

Sakov P., Evensen G., Bertino L. Asynchronous data assimilation with the EnKF // *Tellus Ser A*. 2010. Vol. 62A. P. 24–29. doi: 10.1111/j.1600-0870.2009.00417.x

Soetaert K., Middelburg J. J., Herman P. M., Buis K. On the coupling of benthic and pelagic biogeochemical models // *Earth-Sci. Rev.* 2000. Vol. 51, no. 1–4. P. 173–201. doi: 10.1016/S0012-8252(00)00004-0

Tedesco L., Vichi M. Sea ice biogeochemistry: A guide for modellers // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9(2). e89217. doi: 10.1371/journal.pone.0089217

Zdorovenov R. E., Nazarova L. E., Tolstikov A. V., Bashmachnikov I. L., Bobylev L. P., Brizgalo V. A., Cher-

nook V. V., Denisov V. V., Donchenko V. K., Druzhinin P. V., Evensen G., Filatov A. N., Ingebeikin J. I., Ivanov V. V., Johannessen O. M., Kaitala S., Korosov A. A., Krasnov J. V., Kuosa H., Leonov A. V., Litvinenko A. V., Makarevich P. R., Miles M. W., Melentyev V. V., Nee-
lov I. A., Pettersson L. H., Pozdnyakov D. V., Rastovskuev V. V., Salo Yu. A., Savchuk O. P., Shalina E. V., Shavykin A. A., Stipa T., Stuliy A. N., Volkov V. A., Terzhevik A. Yu., Filatov N. N. White Sea. Its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Springer-Verlag London Ltd, 2005. 444 p.

Поступила в редакцию 22.03.2021

References

Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i prirodnykh faktorov [The White Sea and its catchment under the influence of climate and anthropogenic factors]. Eds. N. N. Filatov, A. Yu. Terzhevik. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. 349 p.

Chernov I., Tolstikov A., Yakovlev N. Kompleksnaya model' Belogo morya: gidrotermodynamika vod i morskogo l'da [Comprehensive model of the White Sea: hydrothermodynamics of water and sea ice]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 8. P. 116–128.

Dianov M. B., Kotov S. V., Nekrasov A. V., Boyarinov P. M., Petrov M. P. Rezul'taty gidrodinamicheskogo modelirovaniya polusutochnykh prilivov v Belom more [Results of hydrodynamical modelling of semidiurnal tides in the White Sea]. Petrozavodsk: Karel. br. AS USSR, 1990.

Doronin Yu. P. Modelirovanie gidrologicheskikh protsessov shel'fovogo morya [Modelling of hydrological processes of a shelf sea]. *Gidrometeorol. – nauch.-tekhn. progressu* [From hydrometeorol. to sci. and tech. progress]. Proceed. Leningrad, 1990. P. 134–146.

Ionov V. V., Mai R. I., Smagin R. E. Chislennaya model' prilivnykh yavlenii v gube Keret (Kandalakshskii zaliv, Beloe more) [Numerical hydrodynamical model of tidal phenomena in the Keret Bay (Kandalakshskiy Bay, the White sea)]. *Izvestiya RGO* [Proceed. RGS]. 2015. Vol. 147, iss. 2. P. 22–37.

Rodionov A. A., Semenov E. V., Zimin A. V. Razvitie sistemy monitoringa i prognoza gidrofizicheskikh polei morskoi sredy v interesakh obespecheniya skrytnosti i zashchity korablei VMF [Development of the system for monitoring and forecasting hydrophysical fields of the marine environment for stealthiness and safety of the Navy]. *Fund. i priklad. gidrofizika* [Fund. and Appl. Hydrophysics]. 2012. Vol. 5, no. 2. P. 89–108.

Sarkisyan A. S., Zalesnyi V. B., Dianskii N. A., Ibraev R. A., Kuzin V. I., Moshonkin S. N., Semenov E. V., Tamsalu R., Yakovlev N. G. Matematicheskie modeli tsirkulyatsii okeanov i morei. Sovremennyye problemy vychislitel'noi matematiki i matematicheskogo modelirovaniya [Mathematical models of circulation of oceans and seas. Current problems of numerical mathematics and mathematical modelling]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modelling]. Vol. 2. Moscow: Nauka, 2005. P. 174–278.

Volodin E. M., Galin V. Ya., Gritsun A. S., Gusev A. V., Dianskii N. A., Dymnikov V. P., Ibraev R. A., Kalmy-

kov V. V., Kostykin S. V., Kulyamin D. V., Lykosov V. N., Mortikov E. V., Rybak O. O., Tolstykh M. A., Fadeev R. Yu., Chernov I. A., Shashkin V. V., Yakovlev N. G. Mathematical modeling of the Earth system. Moscow: MAKSPress, 2016. 328 p.

Yakovlev N. G. On the simulation of temperature and salinity fields in the Arctic Ocean. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. Vol. 48, no. 1. P. 100–116. doi: 10.1134/S0001433812010136

Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study. *J. Marine Syst.* 2018. Vol. 187. P. 23–35. doi: 10.1016/j.jmarsys.2018.06.006

Chernov I., Tolstikov A. The White Sea: available data and numerical models. *Geosciences*. 2020. Vol. 10, iss. 11. Art. 463. doi: 10.3390/geosciences10110463

Lazzari P., Álvarez E., Terzi E., Cossarini G., Chernov I., D'Ortenzio F., Organelli E. CDOM spatiotemporal variability in the Mediterranean Sea: a modelling study. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. Vol. 9, no. 176. P. 1–18. doi: 10.3390/jse9020176

Mussap G., Zavatarelli M. A numerical study of the benthic pelagic coupling in a shallow shelf sea (gulf of Trieste). *Regional Studies in Marine Science*. 2017. Vol. 9. P. 24–34. doi: 10.1016/j.rsma.2016.11.002

Perezhogin P., Chernov I., Iakovlev N. Advanced parallel implementation of the coupled ocean – ice model FEMAO (version 2.0) with load balancing. *Geosci. Model Dev.* 2021. Vol. 14. P. 843–857. doi: 10.5194/gmd-14-843-2021

Sakov P., Evensen G., Bertino L. Asynchronous data assimilation with the EnKF. *Tellus Ser A*. 2010. Vol. 62A. P. 24–29. doi: 10.1111/j.1600-0870.2009.00417.x

Soetaert K., Middelburg J. J., Herman P. M., Buis K. On the coupling of benthic and pelagic biogeochemical models. *Earth-Sci. Rev.* 2000. Vol. 51, no. 1–4. P. 173–201. doi: 10.1016/S0012-8252(00)00004-0

Tedesco L., Vichi M. Sea ice biogeochemistry: A guide for modellers. 2014. *PLoS ONE*. Vol. 9(2). e89217. doi: 10.1371/journal.pone.0089217

Zdorovenov R. E., Nazarova L. E., Tolstikov A. V., Bashmachnikov I. L., Bobylev L. P., Brizgalo V. A., Chernook V. V., Denisov V. V., Donchenko V. K., Druzhinin P. V., Evensen G., Filatov A. N., Ingebeikin J. I., Ivanov V. V., Johannessen O. M., Kaitala S., Korosov A. A.,

*Krasnov J. V., Kuosa H., Leonov A. V., Litvinenko A. V., Makarevich P. R., Miles M. W., Melentyev V. V., Nee-
lov I. A., Pettersson L. H., Pozdnyakov D. V., Rasto-
skuev V. V., Salo Yu. A., Savchuk O. P., Shalina E. V.,
Shavykin A. A., Stipa T., Stuliy A. N., Volkov V. A., Ter-*

zhevik A. Yu., Filatov N. N. White Sea. Its marine envi-
ronment and ecosystem dynamics influenced by global
change. Springer-Verlag London Ltd, 2005. 444 p.

Received March 22, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Чернов Илья Александрович

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Институт прикладных математических исследований
КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: chernov@krc.karelia.ru

Толстик Алексей Владимирович

руководитель лаб. географии и гидрологии, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: alexeytolstikov@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Chernov, Il'ya

Institute of Applied Mathematical Research,
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: chernov@krc.karelia.ru

Tolstikov, Aleksey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: alexeytolstikov@mail.ru