

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА И ПРИЛЕГАЮЩИХ К НЕМУ АКВАТОРИЙ НА ОСНОВЕ РОССИЙСКОЙ МОДЕЛИ INMOM-АРКТИКА

В. В. Фомин

Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН (Москва, Российская Федерация)

И. И. Панасенкова

Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (Москва, Российская Федерация)

А. В. Гусев

Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН, Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

А. В. Чаплыгин

Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН (Москва, Российская Федерация)

Н. А. Дианский

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2021 г.

Для воспроизведения текущего состояния и краткосрочного прогноза гидротермодинамики Северного Ледовитого океана (СЛО) и прилегающих к нему акваторий подготовлена версия σ -модели морской циркуляции INMOM с пространственным разрешением $\sim 3,7$ км (INMOM-Арктика). На открытых боковых границах предписываются скорости течений, сплоченность и толщина морского льда, температура, соленость и уровень моря (включая приливные колебания) из глобальных реанализов или прогнозов. На поверхности океана усваиваются спутниковые данные по температуре поверхности моря и сплоченности ледяного покрова с использованием программного комплекса DART на основе ансамблевого фильтра Калмана EnKF. Проведена настройка и верификация модели INMOM-Арктика в ретроспективных расчетах за период с 1 марта по 31 августа 2020 г. Выполнен анализ качества воспроизведения термохалинных характеристик и проведено сравнение с результатами расчетов по модели HYCOM для СЛО, предоставляемыми службой CMEMS, и с данными профилографов ARGO. Показано, что INMOM-Арктика имеет сопоставимые с CMEMS оценки точности воспроизведения полей температуры и солености для СЛО.

Ключевые слова: модель океана, Северный Ледовитый океан, численное моделирование, морская циркуляция, усвоение данных наблюдений, морской лед.

Введение

В последнее десятилетие уровень моделирования циркуляции в океанах и морях существенно вырос, что обусловлено возросшими возможностями вычислительной техники и распараллеливания вычислений, а это, в свою очередь, позволило увеличить пространственное разрешение глобальных и региональных моделей океана [1; 2]. Для более корректного воспроизведения гидротермодинамики и ледовых характеристик в морях Северного Ледовитого океана (СЛО) уже используются вихреразрешающие модели морской циркуляции. Так, в работе [2] исследовано влияние горизонтального разрешения модели на качество воспроизведения прибрежных течений с использованием версий модели AO-FVCOM (Arctic Ocean Finite-Volume Community Ocean Model) с разрешением 8, 2 и 0,5 км. Показано, что корректность воспроизведения структуры вдольбереговых течений и водообмена через проливы существенным образом повышается с увеличением пространственного разрешения.

Для более точного воспроизведения состояния вод и ледовых характеристик СЛО и его морей разрабатываются совместные модели гидротермодинамики океана и динамики-термодинамики морского льда с привлечением усвоения данных наблюдений. В ARC MFC (Arctic Monitoring Forecasting Centre) используется система TOPAZ4 [3], состоящая из модели морской циркуляции HYCOM для акватории СЛО с разрешением ~12—16 км и продвинутой модели морского льда Лос-Аламосской национальной лаборатории CICE [4], которая разработана для предоставления оперативных прогнозов гидротермодинамических характеристик (скорости течений, температуры, солености, характеристик морского льда и др.) на 10 дней вперед [5].

Среди отечественных работ следует отметить [6], в которой исследуется сезонная изменчивость циркуляции вод и морского льда в СЛО с использованием трехмерной модели динамики океана ИВМИО4.1 с пространственным разрешением 0,1° в триполярной системе координат совместно с моделью морского льда CICE5.1. В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте используется совместная модель циркуляции вод и льдов AARI-IOCM с разрешением 13,8 км для решения научных и прикладных задач по исследованию и прогнозу ледово-гидрологического режима СЛО [7].

В [8] исследуются динамика и состояние вод моря Лаптевых с использованием технологии вложенных сеток для учета мелкомасштабных процессов. При этом используются модель СЛО и Северной Атлантики, разработанная в Институте вычислительной математики и математической геофизики (ИВМиМГ) Сибирского отделения РАН, с пространственным разрешением 0,5° и вложенная модель в окрестности дельты Лены с улучшенным пространственным раз-

решением от 850 м у дельты до 3 км на ее периферии. Для описания процессов динамики и термодинамики морского льда используется модель CICE3.

В Национальном исследовательском университете ИТМО для расчета циркуляции СЛО применяются общеевропейская модель океана NEMO (<https://www.nemo-ocean.eu/>) и модель динамики-термодинамики льда LIM3 [9]. Причем NEMO реализована в двух версиях: для всего СЛО с разрешением 14 км и для акватории западных морей российской Арктики с разрешением 5 км, начальные и граничные условия для которой задаются из общевсейной модели NEMO.

Наиболее совершенной на сегодня из функционирующих оперативных систем является Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS, <https://marine.copernicus.eu>), которая предоставляет данные и детализированные прогнозы состояния морской среды как всего Мирового океана, так и морей Европы и СЛО. Расчеты циркуляции Мирового океана осуществляются в системе CMEMS на основе моделей NEMO и LIM3 с пространственным разрешением 0,083° по долготе и широте. Для расчетов циркуляции СЛО в CMEMS инкорпорирована вышеописанная система TOPAZ4. В число доступных продуктов CMEMS также входят массивы спутниковых и контактных данных наблюдений, параметры морского волнения, реанализы, анализы и прогнозы гидротермодинамических характеристик и характеристик экосистем Мирового океана и региональных акваторий. В целом предоставляемые CMEMS данные имеют хорошую точность, особенно для акваторий европейских морей. Однако качество прогнозов гидрологических характеристик для СЛО, в том числе для окраинных морей России, несколько хуже.

В настоящей работе представлена версия российской модели общей циркуляции океана INMOM (Institute of Numerical Mathematic Ocean Model) [10], реализованная для СЛО и прилегающих к нему акваторий, — INMOM-Арктика. Эта модель является основой реализованной в Государственном океанографическом институте им. Н. Н. Зубова (ГОИН) системы морских ретроспективных расчетов и прогнозов (СМРП) [11]. В [11] представлены региональные версии СМРП на основе INMOM для арктических (Карского, Баренцева, Печорского и Белого), южных (Черного, Азовского и Каспийского), восточных (Японского и Охотского) морей, а также для Балтийского моря. СМРП позволяет проводить как ретроспективные расчеты, так и предоставлять оперативные анализы и краткосрочные прогнозы гидрометеорологических и ледовых характеристик в исследуемых акваториях с высоким пространственным разрешением. Ниже приведены описание INMOM-Арктика и результаты воспроизведения с ее помощью циркуляции СЛО с оценкой точности восстановления термохалинных характеристик СЛО.

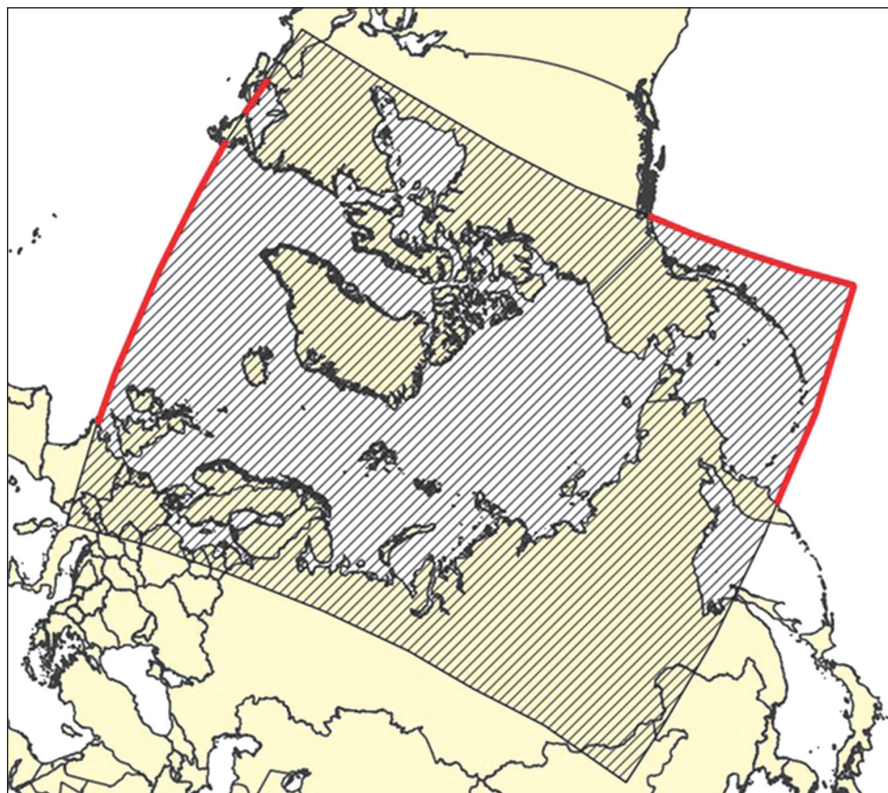


Рис. 1. Область расчета модели INMOM для СЛО и прилегающих акваторий с обозначением открытых границ (красная кривая)
Fig. 1. Computational domain of the INMOM model for the Arctic Ocean and adjacent water areas (red curves relate to the open boundaries)

Общее описание модели INMOM-Арктика

В настоящей работе используется хорошо опробованная российская σ -модель морской и океанической циркуляции INMOM [10], разработанная в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН. Глобальные версии INMOM служат океаническими блоками в различных версиях модели земной системы INMCM (Institute of Numerical Mathematic Climate Model) [12], созданных в ИВМ РАН и участвующих в программе прогнозирования изменений климата под эгидой IPCC/МГЭИК (Intergovernmental Panel on Climate Change / Межправительственная группа экспертов по изменению климата) в рамках проектов CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). Модель INMOM также принимала участие в программе CORE-II (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments, phase II) по исследованию циркуляции Мирового океана и ее изменчивости на основе мультимодельного подхода [13].

Модель INMOM основана на системе физически полных уравнений крупномасштабной гидротермодинамики в приближениях гидростатики и Буссинеска, записанных в обобщенных ортогональных координатах на сфере [10]. По глубине используется изобатическая координата σ , как и в хорошо известных моделях POM [14] и ROMS [15]. Прогностическими

переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости течений, потенциальная температура, соленость и отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности. В настоящей работе используется новая по сравнению с [10] версия INMOM, представленная в [16].

В модель INMOM встроена модель динамики-термодинамики морского льда [10], реализованная на основе упрощенного алгоритма модели CICE [4]. Однако при необходимости к INMOM может подключаться в качестве внешнего модуля модель CICE [4] с более наполненным описанием процессов формирования ледяного поля и включением дополнительных возможностей, например параметризации образования торосов и др. В этом случае модели INMOM и CICE объединяются в совместную модель с помощью так называемого каплера (программной системы, которая организует совместную работу моделей), реализованного с использованием библиотеки ESMF (Earth System Modeling Framework). При использовании ESMF отдельные блоки GridComp отвечают за реализацию компонентов каплера — моделей INMOM и CICE, а за обмен информацией между ними отвечает блок CplComp.

Используемые в INMOM параллельные алгоритмы позволяют проводить вычисления на современных многопроцессорных суперкомпьютерах, существен-

но ускоряющих расчеты, что, в свою очередь, важно для оперативных задач.

INMOM-Арктика реализована для акватории СЛО и прилегающих акваторий (Берингова моря и переходной области между СЛО и Северной Атлантикой), показанных на рис. 1, где отмечены и открытые («жидкие») границы. В INMOM-Арктика используется повернутая сферическая система координат, полюса которой расположены в точках 60° в. д. и 120° з. д. географического экватора, что позволяет избежать проблем устойчивости, возникающих при приближении к Северному полюсу при использовании обычной географической системы координат. При таком подходе при выбранном шаге сетки 1/30° в модельных координатах на рассматриваемой акватории обеспечивается квазиравномерное разрешение ~3,7 км. По глубине задано 25 σ -уровней со сгущением к поверхности океана для более точного описания верхнего деятельного слоя. Шаг по времени составляет 300 с.

Для задания топографии дна использовались данные массива GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) высокого пространственного разрешения 30" [17].

Учет приливных колебаний в рассматриваемой акватории необходим особенно в прибрежных акваториях, где амплитуды приливных колебаний, например у мыса Святой Нос Кольского полуострова, могут достигать 3—4 м, а приливные скорости течений могут составлять 2 м/с и более [18]. Для воспроизведения приливных движений на открытых границах задается временной ход приливных колебаний уровня моря, который восстанавливается по данным модели TPXO 9 (TOPEX/Poseidon Global Tidal Model) [19].

Для расчета атмосферного воздействия используются данные глобального атмосферного реанализа ERA5 с пространственным разрешением 0,25×0,25° (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) с дискретностью по времени 1 ч.

Ретроспективные расчеты по модели INMOM-Арктика с условиями на открытых границах из глобального океанского реанализа CMEMS

Для оценки качества воспроизведения моделью INMOM-Арктика общей циркуляции арктического бассейна проведены расчеты за период с 1 марта по 31 августа 2020 г. В качестве начальных и граничных условий использовались данные глобального анализа и прогноза (GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024) европейской службы CMEMS с пространственным разрешением 1/12° по долготе и широте и с дискретностью по времени 1 сут, полученные на основе модели NEMO-LIM3.

На открытых границах в приграничных полосах точной области шириной в 10 узлов модельной сетки для температуры, солёности и скорости осуществ-

ляется привязка (наджинг) к внешним данным методом добавления релаксационных слагаемых в соответствующие уравнения. Коэффициенты релаксации выбраны равными $2,31 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1} \approx 1/(12 \text{ ч})$ для температуры и солёности и $5,79 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1} \approx 1/(2 \text{ сут})$ для горизонтальной скорости. Для учета изменений уровня моря на открытой границе задается комбинация непериодических колебаний уровня моря из GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024 и периодических колебаний, восстанавливаемых по данным TPXO 9 с помощью специальных процедур, разработанных авторами [19] и адаптированных для использования в модели INMOM.

Кроме того, в потоки тепла и пресной воды между атмосферой и океаном вводятся релаксационные поправки, притягивающие модельные температуру и солёность поверхности океана (ТПО и СПО) к среднемесячным ТПО и СПО из CMEMS с коэффициентом, интерпретируемым как масштаб релаксации ~1/(3 мес) по отношению к 10-метровому приповерхностному слою. Такая привязка к данным наблюдений нужна главным образом для солёности, так как данные о потоках пресной воды на поверхности океана из атмосферных реанализов не обладают достаточной точностью. Усвоение спутниковой информации о ТПО и сплоченности ледового поля в представленных в этом разделе расчетах не проводилось.

Среднемесячные поля отклонений уровня моря от невозмущенного состояния и скорости течений за август 2020 г., полученные по INMOM-Арктика, представлены на рис. 2а и 2в. Модель адекватно воспроизводит основные элементы циркуляции арктического региона: круговорот Бофорта, Восточно-Гренландское течение, трансполярный перенос, вток тихоокеанских вод в СЛО через Берингов пролив (БП). На рис. 2б и 2г представлены карты среднемесячных значений уровня моря и скорости течений в августе 2020 г., построенные по открытым данным глобального анализа и прогноза CMEMS, сынтегрированным на модельную область INMOM-Арктика. Среднемесячные поля уровня моря, рассчитанные по моделям, сопоставимы по точности как в амплитудах изменений уровня (минимальных и максимальных), так и в расположении зон положительных и отрицательных значений. Круговорот Бофорта в INMOM-Арктика воспроизводится более отчетливо, чем в CMEMS. Понижение уровня моря, приуроченное к субполярному циклоническому круговороту Северной Атлантики, менее выражено по сравнению с глобальной моделью, используемой в CMEMS. Это объясняется влиянием открытой границы в INMOM-Арктика, разрезающей круговорот. Тем не менее циркуляция субполярного циклонического круговорота в Северной Атлантике достаточно хорошо воспроизводится, что свидетельствует о корректном учете гидротермодинамических данных на открытой границе.

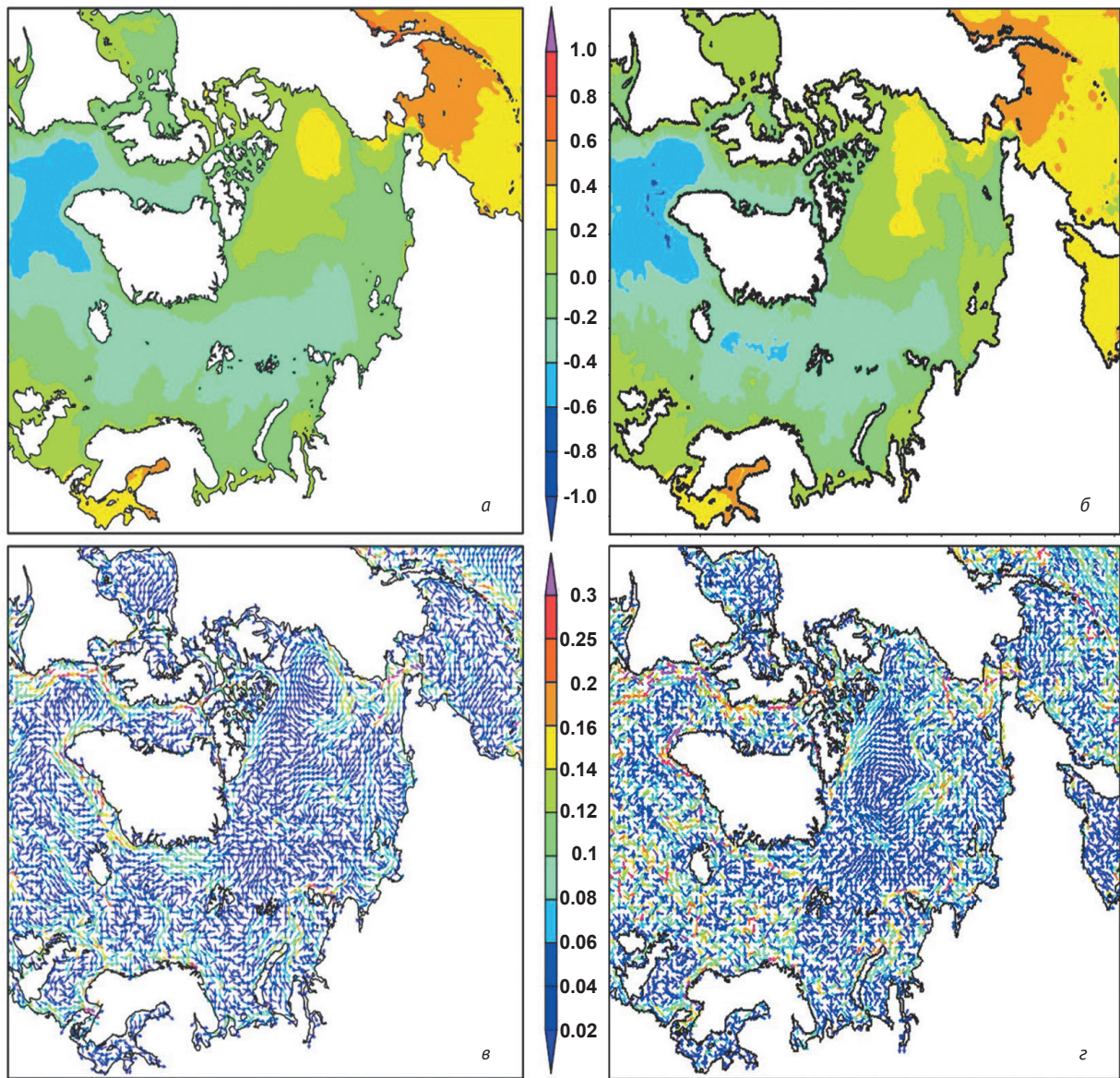


Рис. 2. Результаты расчета гидрологических характеристик: среднемесячный уровень моря (м) за август 2020 г. по модели INMOM-Арктика (а) и по данным глобального анализа и прогноза CMEMS (б), среднемесячная скорость течений в приповерхностном слое (м/с) за август 2020 г. по модели INMOM-Арктика (в) и по данным глобального анализа и прогноза CMEMS (г)
Fig. 2. Simulated hydrological characteristics: monthly mean sea surface height (SSH) (m) for August, 2020, according to the INMOM-Arctic model (a) and according to the global analysis and forecast data from CMEMS (b), monthly mean circulation in the near-surface layer (m/s) for August, 2020, according to the INMOM-Arctic model (v) and according to the global analysis and forecast data from CMEMS (z)

Это подтверждают также циркуляция Берингова моря и водообмен через БП, который определяется двумя причинами — доминирующим термохалинным фактором, формирующим перепад давления от Тихого океана к СЛО (так называемый «pressure-head» forcing [20]), который индуцирует поток через БП на север, и региональным полем ветра, которое в среднегодовом выражении противодействует этому потоку [20]. Результаты расчетов показывают, что в INMOM-Арктика расход через БП, составляющий в среднем ~0,8 Св, хорошо воспроизводится, что очень важно, так как он существенным образом

влияет на формирование структуры вод СЛО, особенно морей Чукотского и Бофорта [20]. Термохалинный фактор формирования северного потока вод через БП проявляется в исходном перепаде уровня моря между Тихим океаном и СЛО, а также между Аляской и Чукоткой (см. рис. 2а). Последний формируется в полном соответствии с геострофикой направленного на север переноса вод.

Корректно воспроизводятся зоны повышенного уровня моря в Балтийском море и в прибрежных зонах вдоль шельфовой зоны Российской Федерации, Канады и США. Некоторые отличия в расчетах

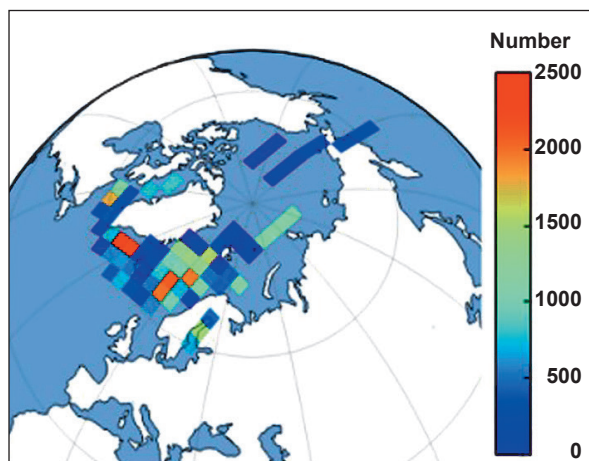


Рис. 3. Количество измерений температуры и солёности с буйев-профилографов в арктическом регионе в квадратах 300×300 км

Fig. 3. The number of temperature and salinity measurements from profiling buoys in the Arctic region in squares 300×300 km

по двум моделям, вероятно, связаны в большей степени с использованием различных данных по топографии дна и атмосферного воздействия, а также учетом в INMOM-Арктика и неучетом в CMEMS приливного воздействия, которое может формировать остаточный вклад в среднемесечном поле уровня моря.

Анализ мгновенных полей приповерхностных скоростей течений и колебаний уровня моря показывает, что на синоптических масштабах существенный вклад в общую циркуляцию СЛО вносит приливное воздействие. Формируются значительные по амплитудам отклонения уровня моря от невозмущенного состояния, особенно заметные у побережья Великобритании, берегов Баренцева и Белого морей, в проливе Гудзон, а также на акватории Берингова моря. Интенсификация наблюдается как для уровня моря, амплитуда колебаний которого может превышать несколько метров, так и для скоростей течений, для которых приливная составляющая вносит значительный (до 1—2 м/с) вклад в суммарные скорости течений, определяемые в том числе дрейфовыми, плотностными и стоковыми течениями.

Валидация расчетов по модели INMOM-Арктика по данным измерений профилей температуры и солёности ARGO

Ниже проводится оценка точности воспроизведения вертикальной структуры термохалинных характеристик, полученной в описанных в предыдущем разделе ретроспективных расчетах циркуляции СЛО, с использованием данных профилографов с ресурса CMEMS за период с 1 мая по 31 августа 2020 г.

Небольшое количество данных измерений с буйев-профилографов ARGO и их неравномерное пространственное распределение в Арктике ограничи-

вают возможности валидации расчетов. Сравнение отдельных профилей в некоторых случаях приводит к значительным различиям, связанным как с влиянием синоптических и мезомасштабных динамических структур (вихрей, струй, внутренних волн и др.), так и с расположением буйев в пограничной зоне, где вероятность встречи с разными водными массами достаточно высока. Соответственно небольшое смещение границы водных масс или неточное определение их местоположения моделью может приводить к большей ошибке в результатах расчетов.

На рис. 3 представлено количество измерений температуры и солёности с буйев-профилографов в квадратах 300×300 км в арктическом регионе, которые были использованы при проведении валидации. Большая часть данных расположена в Северной Атлантике, на акватории Норвежского моря и в западной части Баренцева моря. Незначительная часть буйев наблюдается в морях Беринговом и Лаптевых. В центральной части СЛО данные практически отсутствуют. При проведении валидации данные измерений были дополнительно обработаны: был использован критерий 3- σ , исключены профили со значительными ошибками и нефизичными значениями, не соответствующими району измерений. Исключение ошибочных данных проводилось с учетом климатических значений в соответствующих регионах. Профили, расположенные в Балтийском море, не рассматривались.

Проведен сравнительный анализ оценок точности результатов расчетов по модели INMOM-Арктика с оценками по модели HYCOM для СЛО, которые приведены в техническом отчете CMEMS [21]. Сравнение проводилось за различные периоды и с учетом различной фильтрации данных измерений. В табл. 1 и 2 представлены значения среднего отклонения (CO) и среднеквадратичного отклонения (СКО) для температуры и солёности. CO температуры воды по INMOM-Арктика ниже аналогичных

Таблица 1. CO и СКО данных измерений и результатов расчетов для СЛО в CMEMS по модели HYCOM и СМРП по INMOM-Арктика для температуры воды, °C

CMEMS/HYCOM			СМРП/INMOM-Арктика		
Слой, м	CO	СКО	Слой, м	CO	СКО
0—5	–0,15	0,6	0—30	–0,10	0,89
5—100	–0,3	0,6	30—100	–0,09	0,81
100—300	–0,2	0,8	100—300	–0,11	0,88
300—800	0,5	1,0	300—700	–0,11	0,76
800—2000	0,3	0,6	700—1000	0,16	0,82
			1000—3000	0,12	0,40

Таблица 2. СО и СКО данных измерений и результатов расчетов для СЛО в CMEMS по модели HYCOM и СМРП по INMOM-Арктика для солёности воды, епс

CMEMS/HYCOM			СМРП/INMOM-Арктика		
Слой, м	СО	СКО	Слой, м	СО	СКО
0—5	–0,03	0,2	0—30	–0,04	0,27
5—100	–0,06	0,2	30—100	0,01	0,18
100—300	–0,12	0,3	100—300	0,01	0,12
300—800	–0,02	0,06	300—700	–0,01	0,05
800—2000	0,009	0,04	700—1000	0,01	0,04
			1000—3000	0,01	0,04

значений по данным CMEMS/HYCOM. В приповерхностном горизонте разница составляет 0,05°C, а в средних слоях — 0,6°C. Кроме того, СО принимают отрицательные значения в приповерхностном горизонте, а в придонном — положительные. Значения СКО по данным CMEMS/HYCOM в целом ниже на 0,2—0,3°C. Вероятнее всего, это связано с тем, что данные CMEMS/HYCOM получены в результате моделирования с усвоением данных контактных измерений, что позволяет уменьшить значение ошибки и соответственно уменьшить СКО между данными измерений и модельными результатами.

Анализ результатов по оценке точности воспроизведения солёности показывает, что средняя ошибка по данным CMEMS в приповерхностном горизонте ниже на 0,01 епс, в средних слоях выше на 0,01—0,1 епс и сопоставима в придонных слоях. При этом значения СКО по данным CMEMS/HYCOM в приповерхностном слое ниже на 0,07 епс, в слое 100—300 м выше на 0,18 епс и сопоставимы в придонных слоях. Такой переход и разброс в оценке точности результатов расчетов может быть вызван точностью и дискретностью предоставления результатов расчетов по данным CMEMS/HYCOM. Например, в случае недостаточной дискретности выходных полей CMEMS/HYCOM по вертикали невозможно описать тонкую приповерхностную структуру вод, что и приводит к большим значениям средней ошибки и СКО по данным валидации. В модели INMOM-Арктика эта проблема менее значима, так как данные изначально представлены на σ -горизонтах и далее уже интерполируются в глубины, соответствующие глубинам измерений профилографов ARGO.

Рассмотрим отдельные модельные и наблюдаемые вертикальные профили температуры и солёности с целью выделения особенностей и некоторых проблем по их воспроизведению. На рис. 4 представлены вертикальные профили температуры и со-

лености в Норвежском море по данным буев-профилографов ARGO № 6903557 и 3901619 в точках их всплытия с координатами 2,9146°W, 71,0783°N и 4,966°W, 63,242°N соответственно. Модель INMOM-Арктика адекватно воспроизводит вертикальную структуру вод в этих точках: воспроизводятся точки перегиба на вертикальных профилях и глубины верхнего перемешанного слоя с погрешностью в несколько метров.

Отклонения в определении локальных экстремумов в профилях, вероятнее всего, связаны с несколькими факторами: с завышенной вертикальной турбулентной диффузией в INMOM-Арктика, которая приводит к избыточному перемешиванию, а также с недостаточным количеством модельных уровней по вертикали, что приводит к недооценке и некоторому смещению локальных экстремумов. Наличие в вертикальной структуре данных измерений локальных экстремумов, по-видимому, связано с точностью/ошибками данных измерений или с воздействием внутренних волн, которые наблюдаются в СЛО. Анализ профилей показал, что в основном они наблюдаются на глубинах от 100 до 1000 м и наиболее ярко проявляются в полях солёности. В силу пространственного разрешения в модели они практически не воспроизводятся. Существенное увеличение пространственного разрешения при возможностях современных компьютеров пока невозможно для модели всего СЛО.

Профиль температуры, полученный с использованием буя № 3901619 (см. рис. 4б), соответствует классическому, и модельные расчеты достаточно хорошо согласуются с данными измерений. Однако в профиле солёности на глубинах 80—500 м наблюдается инверсия и соответственно локальный максимум. Этот факт требует дополнительного анализа и, возможно, использования особых методов фильтрации данных измерений для устранения нефизичных и некорректных данных измерений. Это необходимо, так как в дальнейшем планируется внедрение процедур усвоения профилей температуры и солёности в модель INMOM-Арктика с целью повышения точности результатов расчетов. Очевидно, что усвоение некорректных профилей температуры и солёности будет приводить к неправильным результатам расчета циркуляции СЛО.

Расчеты INMOM-Арктика с усвоением спутниковых данных

Усвоение данных наблюдений в моделях морской циркуляции позволяет значительно улучшить качество анализа и прогноза состояния морей. Для модели INMOM-Арктика был реализован алгоритм усвоения спутниковых данных наблюдений ТПО и сплоченности ледяного покрова с использованием программного комплекса DART (Data Assimilation Research Testbed, <https://dart.ucar.edu/>) [22]. DART — система усвоения, включающая в себя различные методы ассимиляции

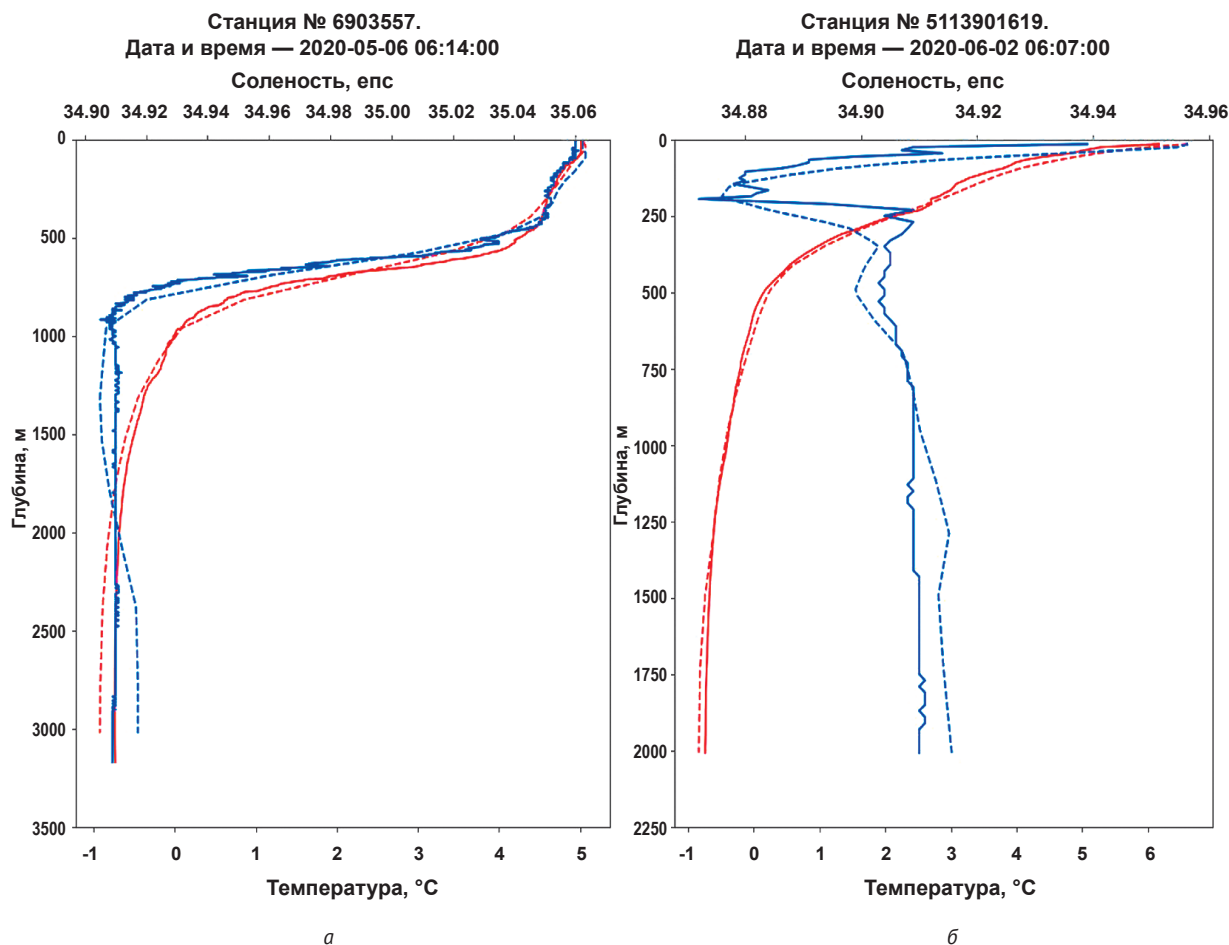


Рис. 4. Рассчитанные (прерывистые красная и синяя кривые соответственно) и измеренные (сплошные красная и синяя кривые соответственно) профили температуры и солености для станций № 6903557 (2,9146°W, 71,0783°N) (а) и № 3901619 (4,966°W, 63,242°N) (б)

Fig. 4. Simulated (dashed red and blue curves, respectively) and measured (solid red and blue curves, respectively) temperature and salinity profiles for stations № 6903557 (2,9146°W, 71,0783°N) (а) and № 3901619 (4,966°W, 63,242°N) (б)

данных наблюдений (в частности EnKF — ансамблевый фильтр Калмана). Программный комплекс достаточно удобен, в нем реализовано значительное количество процедур, упрощающих работу с данными наблюдений (например, процедуры переинтерполяции данных наблюдений и вектора модельного состояния), а также непосредственно процедуры ассимиляции данных наблюдений. DART широко используется при реализации алгоритмов усвоения в различных численных моделях атмосферы WRF [23] и CAM [24], океана POP [14] и ROMS [15], суши CLM (<https://www.cgd.ucar.edu/tss/clm/distribution/index.html>), модели морского льда CICE [5] и др.

Для INMOM-Арктика был реализован алгоритм усвоения на основе метода EnKF, для которого используются спутниковые данные из CMEMS по ТПО и сплоченности ледового поля с дискретностью по времени 1 сут. При реализации алгоритма усвоения вводится дополнительная коррекция. Предполагается, что температура воды не может быть меньше температуры замерзания, а сплоченность ледового

поля изменяется в пределах от 0 до 1. Расчеты гидротермодинамических и ледовых характеристик по модели INMOM-Арктика проводились в режиме наукастинга и представляли собой прогностические прогоны на 24 ч вперед с усвоением данных наблюдений. Схематично алгоритм усвоения представлен на рис. 5.

Расчеты по модели INMOM-Арктика проходили с 12 мая по 12 июня 2020 г. Каждый день сначала проводился прогностический прогон без усвоения, а затем — расчет в режиме наукастинга с усвоением (с периодичностью один раз в сутки). Для процедуры усвоения по методу EnKF в DART необходим набор модельных состояний (ансамбль), состоящих из полей ТПО и сплоченности морского льда. Количество элементов ансамбля полагалось равным 25. Для текущего прогона с усвоением ансамбль формировался следующим образом: из предыдущего прогона в режиме наукастинга на 24 ч с усвоением и прогона без усвоения спутниковых данных выбиралось по 12 элементов с шагом по времени 2 ч. Далее последний элемент ансамбля представлял

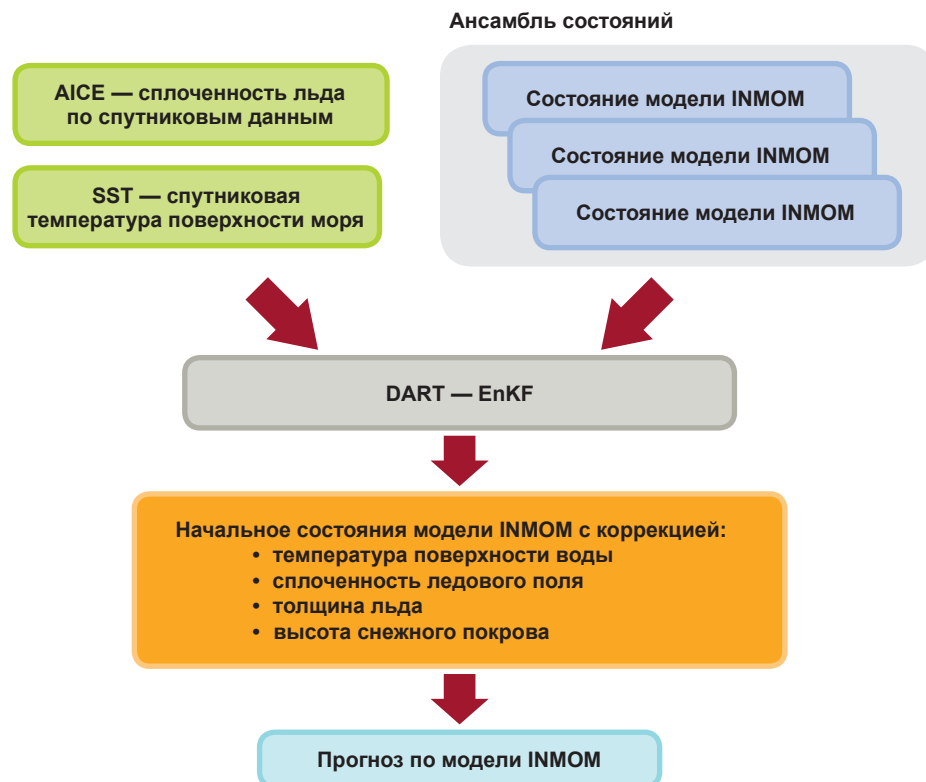


Рис. 5. Блок-схема реализации алгоритма усвоения DART в модели INMOM
Fig. 5. DART assimilation technique flowchart implemented in the INMOM model

собой результаты предыдущего прогона с усвоением через 24 ч от его начала.

При проведении расчетов усваивалось только 10% спутниковой информации, а остальная использовалась для независимой оценки точности расчетов. В качестве начальных условий для ТПО и сплоченности льда при прогностическом прогоне с усвоением использовалось поле анализа, полученное методом EnKF на основе построенного ансамбля модельных состояний.

На рис. 6 представлены результаты расчета среднеквадратичного отклонения значений спутниковой ТПО и сплоченности льда с расчетами без усвоения, данными прогноза (рассчитанными через 24 ч после усвоения) и данными анализа (после усвоения). Без усвоения значение среднеквадратичной ошибки температуры составляет $1,0^{\circ}\text{C}$, в поле анализа — $\sim 0,74^{\circ}\text{C}$, а в поле прогноза — $\sim 0,8^{\circ}\text{C}$ (рис. 6а). В целом усвоение 10% данных измерений из общего набора данных позволяет в среднем снизить отклонение на $0,25^{\circ}\text{C}$. При этом видно, что наименьшие коррекции в результате усвоения наблюдаются в случаях меньших значений отклонений результатов расчетов от данных измерений, а наибольшие — в случае больших значений отклонений (более $1,0^{\circ}\text{C}$). Через 24 ч после усвоения ошибка в поле прогностического прогона увеличивается в среднем на $0,08^{\circ}\text{C}$. Такое значительное повышение ошибки связано, вероятнее всего,

с пространственной неоднородностью усваиваемых данных.

Сравнение сплоченности льда проводилось в том числе в точках открытой воды, определяемых по данным спутниковых измерений. В первые дни после начала усвоения значения СКО сплоченности льда уменьшаются и достигают значений $\sim 0,06$ (см. рис. 6б). Далее наблюдается незначительное колебание сплоченности льда в пределах $0,053\text{—}0,065$, при этом отклонение в результатах расчетов без усвоения не наблюдается меньше $0,138$. То есть в среднем усвоение даже 10% данных спутниковых измерений позволяет уменьшить значение СКО на $0,09\text{—}0,1$. Алгоритм усвоения сплоченности льда по спутниковым данным позволяет существенным образом повысить точность расчетов ледовых характеристик в прикромочной области и в областях с интенсивным таянием льда. В случае усвоения большего числа данных измерений точность расчетов может также возрасти.

Заключение

Для воспроизведения текущего состояния и краткосрочного прогноза гидротермодинамики Северного Ледовитого океана и прилегающих к нему акваторий на основе российской σ -модели общей циркуляции океана INMOM подготовлена ее региональная версия INMOM-Арктика. Модель реализована в повернутой сферической системе координат.

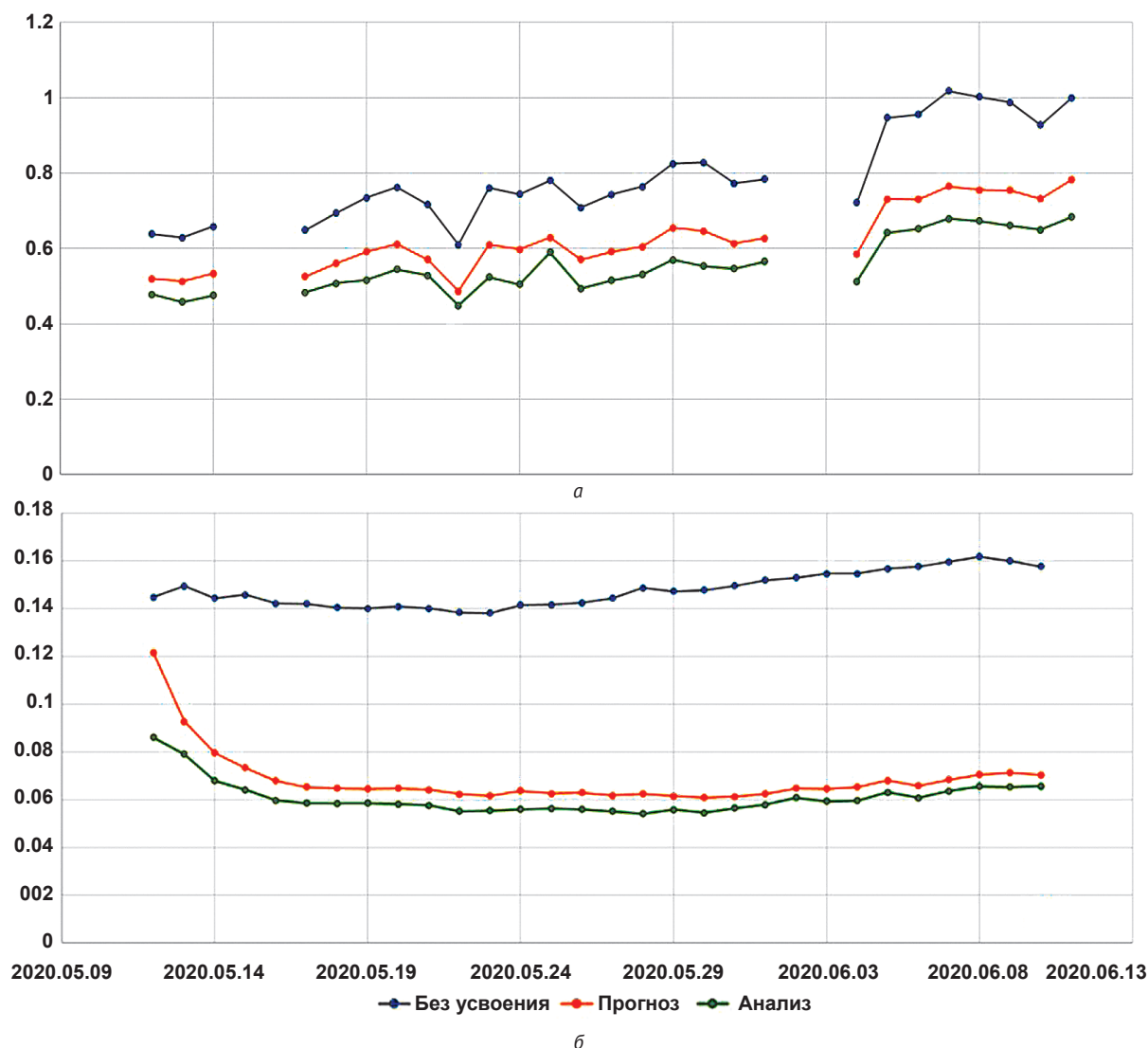


Рис. 6. Временной ход среднеквадратичного отклонения спутниковых данных от результатов расчетов с усвоением (данными анализа и прогноза) и без усвоения данных наблюдений: ТПО (°C) (а) и сплоченность льда (б)
Fig. 6. Time series of the RMS difference between satellite data and simulation results with assimilation (analysis and forecast data) and without assimilation of observational data: SST (°C) (a) and ice compactness (b)

нат, полюса которой расположены в точках 60° в. д. и 120° з. д. географического экватора, в результате чего на всей акватории СЛО обеспечивается квази-равномерное разрешение ~3,7 км. Следует особо подчеркнуть, что физически полная модель INMOM-Арктика реализована с таким высоким пространственным разрешением для всего СЛО и прилегающих к нему акваторий.

На открытых границах модельной области используются данные по температуре, солености, горизонтальной скорости и уровню моря из модели более обширной области. В настоящей работе эти данные берутся из базы данных продукта CMEMS. Для учета приливного воздействия в модели INMOM-Арктика на открытых границах задается временной ход приливного уровня моря из данных атласа TPXO 9. Для расчета атмосферного

воздействия используются данные глобального реанализа атмосферной циркуляции ERA5 с пространственным разрешением 0,25×0,25° с дискретностью по времени 1 ч. В зависимости от поставленной задачи в качестве атмосферного воздействия могут использоваться и другие доступные реанализы и прогнозы, например Global Forecast System (GFS, <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>) и др.

Оценки точности восстановления полей температуры и солености по модели INMOM-Арктика на сезонном масштабе проводились по данным буев-профилографов ARGO в ретроспективных расчетах циркуляции СЛО за период с 1 марта по 31 августа 2020 г. без усвоения данных наблюдений. Эти оценки точности сравнивались с аналогичными оценками

ми службы CMEMS для СЛО для среднего отклонения и СКО в пределах близких слоев для температуры и солёности соответственно. В поле температуры результаты, полученные по модели INMOM-Арктика, имеют как сопоставимые, так и лучшие показатели по среднему отклонению по всему СЛО, но несколько худшие в верхнем 300-метровом слое по СКО температуры, которое по результатам INMOM-Арктика несколько выше, чем по CMEMS. В более глубоких слоях, наоборот, СКО температуры меньше либо сопоставимо с результатами CMEMS.

В поле солёности оценки точности по среднему отклонению и СКО, полученные по данным CMEMS и модели INMOM-Арктика, сопоставимы между собой. В приповерхностных слоях СКО в INMOM-Арктика несколько выше аналогичных значений, полученных по CMEMS. Однако INMOM-Арктика дает несколько лучшие оценки в средних отклонениях от данных измерений температуры и солёности по глубине.

СКО между рассчитанным и измеренным с ИСЗ уровнями океана в модели INMOM-Арктика равно 6 см, тогда как в CMEMS оно равно 7 см.

Кроме того, в INMOM-Арктика хорошо воспроизводится термохалинное состояние СЛО на синоптических масштабах, что показывают сравнения расчетов и реальных данных профилографов ARGO о профилях температуры и солёности. В целом модель достаточно хорошо воспроизводит вертикальную структуру вод. Однако необходимо проводить более детальный анализ данных измерений и их более детальную и корректную фильтрацию для исключения нефизичных профилей и измерений. Это связано с тем, что в дальнейшем планируется реализация процедур усвоения профилей температуры и солёности. Усвоение некорректных профилей может привести к неправильным результатам расчета циркуляции в СЛО.

Результаты сравнения расчетов и данных наблюдений свидетельствуют, что в текущей реализации модель INMOM-Арктика с использованием предложенных условий на открытых границах позволяет корректно воспроизводить циркуляцию СЛО.

В следующей серии экспериментов для повышения точности расчетов к INMOM-Арктика была подключена процедура ассимиляции текущих спутниковых данных по сплоченности ледяного покрова и ТПО на основе программного комплекса DART (Data Assimilation Research Testbed, <https://dart.ucar.edu/>), работающего на основе EnKF — ансамблевого фильтра Калмана. Было показано, что усвоение данных измерений спутниковой поверхностной температуры и сплоченности ледового поля позволяет улучшить результаты расчетов путем ежедневного усвоения спутниковой информации. Следует ожидать, что при усвоении большего числа данных, а также построении ансамблей модельных состояний другими способами можно достичь более высоких показателей точности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 17-17-01295) и РФФИ (грант № 18-05-60111), а также в рамках работ научно-образовательного центра «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования» по проекту «Создание системы гидрометеорологического моделирования и прогнозирования состояния морской среды для обеспечения развития экономического потенциала российской Арктики» (направление «Северный морской путь и связанность арктических территорий»). Численные расчеты проведены с использованием оборудования Межведомственного многопроцессорного суперкомпьютерного центра РАН (<http://www.jscc.ru/>), а параллельная реализация модели INMOM выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-31-90109_Аспиранты.

Литература/References

1. Maltrud M. E., McClean J. L. An eddy resolving global 1/10° ocean simulation. *Ocean Modelling*, 2005, vol. 8 (1—2), pp. 31—54. DOI: 10.1016/j.ocemod.2003.12.001.
2. Chen C., Gao G., Zhang Y., Beardsley R. C., Lai Z., Qi J., Lin H. Circulation in the arctic ocean: Results from a high-resolution coupled ice-sea nested global-fvcom and arctic-fvcom system. *Progress in Oceanography*, 2016, vol. 141, pp. 60—80. DOI: 10.1016/j.pocean.2015.12.002.
3. Sakov P., Counillon F., Bertino L., Lisæter K. A., Oke P. R., Korabely A. TOPAZ4: an ocean-sea ice data assimilation system for the North Atlantic and Arctic. *Ocean Science*, 2012, vol. 8 (4), pp. 633—656. DOI: 10.5194/osd-9-1519-2012.
4. Hunke E. C., Lipscomb W. H., Turner A. K., Jeffery N., Elliott S. CICE: The Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 5.1 (Tech. Rep. LA-CC-06-012). Los Alamos, NM, Los Alamos National Laboratory, 2015.
5. Xie J., Bertino L., Counillon F., Lisæter K. A., Sakov P. Quality assessment of the TOPAZ4 reanalysis in the Arctic over the period 1991—2013. *Ocean Science*, 2017, vol. 13, pp. 123—144. DOI: 10.5194/os-13-123-2017.
6. Kalnitskii L. Y., Kaurkin M. N., Ushakov K. V., Ibrayev R. A. Seasonal Variability of Water and Sea-Ice Circulation in the Arctic Ocean in a High-Resolution Model. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56 (5), pp. 522—533. DOI: 10.1134/S0001433820050060.
7. Кулаков М. Ю., Макшtas А. П., Шутилин С. В. AARI-IOCM — совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого Океана // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2012. — № 2 (92). — С. 6—18. Kulakov M. Y., Makshtas A. P., Shutilin S. V. Coupled ice-ocean model for the Arctic Ocean. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. [Arctic and Antarctic Research], 2012, vol. 2 (92), pp. 6—18. (In Russian).
8. Golubeva E., Platov G., Malakhova V., Kraineva M., Iakshina D. Modelling the long-term and inter-annual

- variability in the Laptev Sea hydrography and subsea permafrost state. *Polarforschung*, 2018, vol. 87 (2), pp. 195—210. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.195.
9. Hvatov A., Nikitin N. O., Kalyuzhnaya A. V., Kosukhin S. S. Adaptation of NEMO-LIM3 model for multigrid high resolution Arctic simulation. *Ocean Modelling*, 2019, vol. 141, 101427. DOI: 10.1016/j.ocemod.2019.101427.
10. Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. — М.: Физматлит, 2013. — 272 с.
- Diansky N. A. Ocean circulation modelling and research of its response to short-term and long-term atmospheric forcing. Moscow, Fizmatlit, 2013, 272 p. (In Russian).*
11. Дианский Н. А., Панасенкова И. И., Фомин В. В. и др. Система оперативных и ретроспективных расчетов гидрометеорологических параметров и морского льда для западных морей российской Арктики // Мор. информ.-управляющие системы. — 2020. — Т. 17, № 1. — С. 44—51. — URL: <http://oceanplatform.ru/journal/>.
- Diansky N. A., Panasenкова I. I., Fomin V. V., Gusev A. V., Kabatchenko I. M. Marine Hindcast and Forecasting system for the Russian Arctic seas. Mor. inform.-upravlyayushchie sistemy, 2020, vol. 17 (1), pp. 44—51. Available at: <http://oceanplatform.ru/journal/>. (In Russian).*
12. Volodin E. M., Mortikov E. V., Kostykin S. V., Galin V. Ya., Lykossov V. N., Gritsun A. S., Diansky N. A., Gusev A. V., Iakovlev N. G. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. *Climate. Dynamics*, 2017. DOI: 10.1007/s00382-017-3539-7.
13. Danabasoglu G., Yeager S. G., Kim W. M. et al. North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Pt. II: Inter-annual to decadal variability. *Ocean Modelling*, 2016, vol. 97, pp. 65—90. DOI: 10.1016/j.ocemod.2013.10.005.
14. Blumberg A. F., Mellor G. L. A description of a three-dimensional hydrodynamic model of New York harbor region. *J. Hydr. Eng.*, 1987, vol. 125, pp. 799—816.
15. Shchepetkin A. F., McWilliams J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 2005, vol. 9, pp. 347—404. DOI: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
16. Moshonkin S., Zalesny V., Gusev A. Simulation of the Arctic — North Atlantic Ocean Circulation with a Two-Equation K-Omega Turbulence Parameterization. *J. of Marine Science and Engineering*, 2018, vol. 6, no. 3, 95. DOI: 10.3390/jmse6030095.
17. Becker J. J., Sandwell D. T., Smith W. F., Braud J. et al. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS. *Marine Geodesy*, 2009, vol. 32 (4), pp. 355—371. DOI: 10.1080/01490410903297766.
18. Попов С. К., Лобов А. Л., Елисов В. В., Батов В. И. Прилив в оперативной модели краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в Белом и Баренцевом морях // Метеорология и гидрология. — 2013. — № 6. — С. 68—82.
- Popov S. K., Lobov A. L., Elisov V. V., Batov V. I. Tide in operational model for short-term forecast of sea level and current velocity in the White and Barents Seas. Meteorologiya i gidrologiya, 2013, vol. 6, pp. 68—82. (In Russian).*
19. Egbert G. D., Erofeeva S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, vol. 19.2, pp. 183—204.
20. Woodgate R. A. Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data. *Prog. Oceanogr.*, 2018, vol. 160, pp. 124—154. DOI: 10.1016/j.pcean.2017.12.007.
21. Melsom A., Simonsen M., Bertino L., Hackett B., Waagbø G. A., Raj R. Quality Information Document for Arctic Ocean Physical Analysis and Forecast Product ARCTIC_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_002_001_A. CMEMS internal report. 2020, iss. 6.1. Available at: <https://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-ARC-QUID-002-001a.pdf>.
22. Anderson J. L., Hoar T., Raeder K., Liu H., Collins N., Torn R., Arellano A. The Data Assimilation Research Testbed: A Community Facility. *Bull. of the American Meteorological Society*, 2009, vol. 90, pp. 1283—1296. DOI: 10.1175/2009BAMS2618.1.
23. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al. A description of the advanced research WRF Version 3. NCAR Technical Notes, 2008.
24. McCaa J. R., Rothstein M., Eaton B. E., Rosinski J. M., Kluzek E., Vertenstein M. User's Guide to the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). Technical Report NCAR, Boulder, Colorado, 2004. Available at: <http://www.cesm.ucar.edu/models/atm-cam/>.

Информация об авторах

Фомин Владимир Васильевич, старший научный сотрудник, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), младший научный сотрудник, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 8), e-mail: vladimirfomin@live.com.

Панасенкова Ирина Игоревна, младший научный сотрудник, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), e-mail: ipanasenkova@mail.ru.

Гусев Анатолий Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 8), стар-

ший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский проспект, д. 36), e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com.

Чаплыгин Андрей Викторович, аспирант, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 8), e-mail: achaplygin99@gmail.com.

Дианский Николай Ардальянович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, доцент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), заведующий отделом, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), ведущий научный сотрудник, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 8), e-mail: nikolay.diansky@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Фомин В. В., Панасенкова И. И., Гусев А. В. и др. Система оперативного моделирования Северного Ледовитого океана и прилегающих к нему акваторий на основе российской модели INMOM-Арктика // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 205—218. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-205-218.

OPERATIONAL FORECASTING SYSTEM FOR ARCTIC OCEAN USING THE RUSSIAN MARINE CIRCULATION MODEL INMOM-ARCTIC

Fomin, V. V.

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS
(Moscow, Russian Federation)

Panasenkova, I. I.

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute (Moscow, Russian Federation)

Gusev, A. V.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS, P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS
(Moscow, Russian Federation)

Chaplygin, A. V.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS (Moscow, Russian Federation)

Diansky, N. A.

Lomonosov Moscow State University, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute,
Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS (Moscow, Russian Federation)

The article was received on February 3, 2021

Abstract

A regional σ -model INMOM-Arctic has been prepared on the basis of the Russian ocean general circulation model INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) to reproduce the current state and short-term forecast of the Arctic Ocean (AO) hydrothermodynamics. The model is implemented in a rotated spherical coordinate system with the poles located at 60°E and 120° W on the geographic equator, which makes it possible to use a quasi-uniform resolution of ~ 3,7 km in the Arctic Basin. Data on temperature, salinity, horizontal velocity components and sea level taken from the CMEMS ocean products are used at the AO open boundaries. To take into account the tidal effect in the INMOM-Arctic model at open boundaries, the time series of the tidal sea level is set based on the data of the TPXO 9 atlas (TOPEX/Poseidon Global Tidal Model) with a spatial resolution of 1/30°. To calculate the atmospheric impact, the researches use the atmospheric circulation data from the Era 5 global reanalysis with a spatial resolution of 0,25×0,25° and with a temporal resolution of 1 hour.

While estimating the accuracy in the temperature and salinity fields reconstructed by the INMOM-Arctic model on a seasonal scale the authors used the data from ARGO profiler buoys in retrospective simulations of the AO circulation for the period from March 1 to August 31, 2020, without assimilating observational data. They compared the estimates with similar ones from the CMEMS for the Arctic Basin for mean deviation and RMSD within close layers for temperature and salinity fields, respectively. In the temperature field, the INMOM-Arctic results

have comparable and better indicators in terms of the mean deviation throughout the entire AO, and somewhat worse, in terms of the RMSD temperature in the upper 300 m layer, which, according to the INMOM-Arctic results, is slightly higher than according to the CMEMS. In deeper layers, on the contrary, in the INMOM-Arctic it is less or comparable.

In the salinity field, the accuracy estimates obtained from the CMEMS data and the INMOM-Arctic model are comparable. In the near-surface layers, the RMSD in the INMOM-Arctic model is slightly higher than the analogous values obtained by CMEMS. However, the INMOM-Arctic model gives slightly better estimates in the mean deviations from the temperature and salinity measurements in depth. The RMSD between the simulated and measured sea level in the INMOM-Arctic model is 6 cm, while in the CMEMS it is 7 cm.

In addition, the INMOM-Arctic model reproduces well the thermohaline state of the AO on synoptic scales, which is clear via comparison between simulation results and measured data of temperature and salinity profiles by the ARGO profiler buoys.

The results of comparison between the simulated and observed data indicate that in the current implementation the INMOM-Arctic model using the proposed open boundary conditions makes it possible to reproduce correctly the circulation in the AO.

In the next series of experiments, to improve the accuracy of simulations, the researchers implemented the procedure for assimilation of current satellite data on ice compactness and SST, based on the DART (Data Assimilation Research Testbed) software package (<https://dart.ucar.edu/>), using the EnKF — Ensemble Kalman Filter, in the INMOM-Arctic model. Thus, they proved that the assimilation of the satellite-measured SST and ice compactness makes it possible to improve the simulation results through the daily assimilation of satellite information.

Keywords: *ocean model, Arctic Ocean, numerical modelling, marine circulation, data assimilation, sea ice.*

The work was supported by the RSF (grant No. 17-17-01295) and the RFBR (grant No. 18-05-60111), as well as within the framework of the scientific and educational center “Russian Arctic: new materials, technologies and research methods” under the project “Development of the marine hindcast and forecasting system to ensure amplification of the Russian Arctic economic potential” (direction “The Northern Sea Route and connectivity of the Arctic territories”). Numerical simulations were performed with the hardware of the Interdepartmental Multiprocessing Supercomputer Center of the RAS (<http://www.jssc.ru/>), the parallel implementation of the INMOM model was carried out within the framework of the RFBR (grant No. 20-31-90109_Postgraduates).

Information about the authors

Fomin, Vladimir Vasil'evich, Senior Researcher, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute (6, Kropotkinsky lane, Moscow, Russia, 119034), Junior Researcher, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS (8, Gubkina st., Moscow, Russia, 119333), e-mail: vladimirfomin@live.com.

Panasenkova, Irina Igorevna, Junior Researcher, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute (6, Kropotkinsky lane, Moscow, Russia, 119034), e-mail: ipanasenkova@mail.ru.

Gusev, Anatoly Vladimirovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS (8, Gubkina st., Moscow, Russia, 119333), Senior Researcher, P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS (36, Nakhimovsky av., Moscow, Russia, 117997), e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com.

Chaplygin, Andrei Viktorovich, Postgraduate, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS (8, Gubkina st., Moscow, Russia, 119333), e-mail: achaplygin99@gmail.com.

Diansky, Nikolay Ardal'yanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Associate Professor, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), Head of the Division, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet (6, Kropotkinsky lane, Moscow, Russia, 119034), Leading Researcher, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS (8, Gubkina st., Moscow, Russia, 119333), e-mail: nikolay.diansky@gmail.com.

Bibliographic description of the article

Fomin, V. V., Panasenkov, I. I., Gusev A. V., Chaplygin, A. V., Diansky, N. A. Operational forecasting system for Arctic Ocean using the Russian marine circulation model INMOM-Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 2, pp. 205—218. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-205-218. (In Russian).

© Fomin V. V., Panasenkov I. I., Gusev A. V., Chaplygin A. V., Diansky N. A., 2021