

Воспроизведение гидротермодинамических характеристик Западно-Арктических морей России с усвоением данных по температуре поверхности моря и сплочённости ледяного покрова

И.И. Панасенкова,^{1,2,*} В.В. Фомин,^{1,2,3} Н.А. Дианский^{1,2,3,4}

¹Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет
Россия, 119034, Москва, Кропоткинский пер., д. 6, стр. 1

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
Россия, 123242, Москва, Большой Предтеченский пер., 11-13

³Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 8

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2
(Поступила в редакцию 16.10.2024; после доработки 26.11.2024; подписана в печать 29.11.2024)

Надежное прогнозирование метеорологических, гидротермодинамических и ледовых характеристик на акватории Западно-Арктических морей России с использованием моделей атмосферной циркуляции, морской циркуляции и морского льда в настоящее время невозможно без усвоения данных наблюдений. Оно позволяет повысить качество начального состояния гидрофизических и ледовых характеристик в моделях для проведения прогностических расчетов и тем самым улучшить их точность. В работе представлен метод усвоения спутниковых данных по температуре поверхности моря SST (Sea Surface Temperature) и сплочённости ледяного покрова SIC (Sea Ice Concentration) в модели морской гидротермодинамики INMOM с использованием программного комплекса DART (Data Assimilation Research Testbed) с оценкой корректности работы используемого алгоритма усвоения. Проведен сравнительный анализ точности прогностических расчетов состояния морской гидротермодинамики с усвоением спутниковых данных SST и SIC и без усвоения. Показано, что усвоение спутниковых данных уменьшает среднеквадратичное отклонение (СКО) результатов прогностических расчетов с заблаговременностью 24 ч от данных наблюдений на ~80% для SST и на 60–70% для SIC по сравнению с расчетом без усвоения. Временная изменчивость СКО при прогнозе SST и SIC показала, что наибольшие их ошибки наблюдаются в периоды интенсивного прогрева верхнего слоя моря и таяния льда. Отмечена важность совместного усвоения данных SST и SIC: более точное воспроизведение SST повышает точность расчетов потоков тепла и соли на границе океан-лёд, которые регулируют процессы термического нарастания/таяния льда, и, как следствие, улучшается воспроизведение площади льда и его кромки. В свою очередь, более корректный расчет SIC напрямую повышает точность расчетов потоков тепла на границе вода-воздух и тем самым и SST.

PACS: 92.10.-с УДК: 551.465

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, методы усвоения данных наблюдений, EnOI, спутниковые данные.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2520902](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2520902)

ВВЕДЕНИЕ

В связи с интенсивным хозяйственным освоением арктического шельфа, в условиях активного использования Северного морского пути (СМП), при освоении и эксплуатации нефтегазоконденсатных месторождений требуется развитие сервисов гидрометеорологического обеспечения (СГМО) на акваториях арктических морей ввиду их труднодоступности и суровых климатических условий. СГМО необходимы для оперативного планирования работ, повышения безопасности, а также для предупре-

ждения о возможности возникновения неблагоприятных и опасных природных явлений, при ликвидации чрезвычайных ситуаций в морях. В современных условиях при активном развитии вычислительной техники такие задачи могут эффективно решаться с использованием численных моделей атмосферы и океана для проведения прогноза метеорологических, гидрологических и ледовых характеристик, а также характеристик ветрового волнения. Для повышения точности прогнозов практически все современные численные модели реализуются с усвоением доступных данных наблюдений.

Изначально методы усвоения данных разрабатывались и развивались для подготовки начальных условий, необходимых для проведения модельных атмосферных прогнозов и лишь затем на-

* E-mail: ipanasenkova@mail.ru

шли свое применение и в моделях морской циркуляции для решения задач оперативной океанографии. Современные методы усвоения подразделяются на два основных класса: (1) вариационные методы, основанные на вариационных принципах поиска минимума функционала, описывающего отклонение модельного решения от данных измерений в некоторой заданной метрике как функции начальных (и/или граничных) условий (см., например, [1–5]), и (2) динамико-стохастические методы, основанные на использовании алгоритма фильтра Калмана/ансамблевого фильтра Калмана (Ensemble Kalman filter, EnKF) [6, 7] или ансамблевой оптимальной интерполяции (Ensemble Optimal Interpolation, EnOI) [8, 9]. Кроме того, существуют и другие методы усвоения, например метод частиц (Particle filter) [10] или оригинальный метод Generalized Kalman Filter (GKF) [11].

Следует отметить, при реализации усвоения четырехмерным вариационным методом (4D-Var) требуется трудоемкое создание сопутствующей сопряженной модели [1–3], а также хранения прямых и обратных расчетов за некоторый интервал времени, что, как правило, требует существенного дискового пространства. В отличие от метода 4D-Var при использовании метода трехмерного вариационного анализа (3D-Var) не требуется построения сопряженной модели [12, 13]. В случае алгоритмов EnKF или EnOI связи между известным (наблюдаемым) и неизвестным модельным состоянием определяются через математическое ожидание и ковариационные функции. Каждый из описанных подходов имеет свои преимущества и недостатки (см., например, [3, 6, 8, 11, 14]). В настоящей работе будет использован метод EnOI, позволяющий эффективнее, по сравнению с EnKF, использовать вычислительные ресурсы, а также строить ансамбль модельных решений на основе ретроспективных расчетов.

В настоящее время существуют отечественные и зарубежные системы оперативного анализа и прогноза гидротермодинамических характеристик арктических морей: российская система краткосрочного прогноза уровня и течений Белого и Баренцева морей, разработанная в Гидрометцентре (ГМЦ) РФ [15], российская система оперативного прогноза для Северного Ледовитого океана (СЛО) и его морей, разработанная в ААНИИ [16], зарубежная открытая система TOPAZ4 (Towards an Operational Prediction system for the North Atlantic European coastal Zones) [17] для оперативного прогноза характеристик Арктического бассейна и Северной Атлантики. В системе TOPAZ4, в отличие от представленных российских систем прогноза, реализован метод усвоения данных на основе EnKF. В основе системы TOPAZ4 лежит региональная версия модели океана HYCOM (The Hybrid Coordinate Ocean Model) с пространственным разрешением 12–16 км. Для акватории Баренцева моря (БМ) функционирует оперативная система Barents-2.5 [18], которая предоставляет прогнозы основных гидрологических характеристик и морского льда с заблаговременно-

стью 66 ч. В ней используется модель морской циркуляции Regional Ocean Modeling System (ROMS) с разрешением 2.5 км и с усвоением данных наблюдений *in-situ*, спутниковых данных SST и SIC также методом EnKF.

Российская σ -модель морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [19, 20] в версии для Западно-Арктических морей России (Баренцева, Карского, Белого и Печорского морей) является основой реализованной в Государственном океанографическом институте им. Н.Н. Зубова (ФГБУ «ГОИН») Системы морских метроспективных расчетов и мрознозов (СМРП) гидрометеорологических и ледовых характеристик [21]. Данная система с 2017 г. функционирует в оперативном режиме в ФГБУ «ГОИН» и предоставляет прогнозы с заблаговременностью 72 ч. В работе представлена версия СМРП для прогнозирования гидрометеорологических характеристик для акватории Западно-Арктических морей России с реализованной процедурой усвоения спутниковых данных SST и SIC методом ансамблевой оптимальной интерполяции (EnOI). Целью работы является исследование качества воспроизведения гидротермодинамических и ледовых характеристик Западно-Арктических морей России и оценка точности их воспроизведения с учетом сезонной изменчивости. Для этого были решены следующие задачи: с использованием модели INMOM, реализованной для Западно-Арктических морей России с алгоритмом усвоения доступных спутниковых данных наблюдений SST и SIC по методу EnOI, проведены расчеты гидротермодинамических и ледовых характеристик в квазиоперативном режиме; проведен анализ их пространственно-временной изменчивости; выполнена оценка точности расчетов с усвоением спутниковых данных и без усвоения.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Модель морской циркуляции

Для расчета гидротермодинамических и ледовых характеристик использовалась модель морской циркуляции INMOM [19, 20] в версии для Западно-Арктических морей [21] с пространственным разрешением 2.5–2.7 км и с включенной в неё моделью динамики–термодинамики морского льда [22].

Расчетная область модели охватывала Белое, Баренцево, Печорское и Карское моря, а на севере в расчетную область попадали арх. Шпицберген, арх. Земля Франца–Иосифа (ЗФИ) и арх. Северная Земля. Модель представлена в повернутой сферической системе координат со смещенным полюсом (в точке с географическими координатами 53.0° E и 25.0° N). По глубине задавалось 20 σ -уровней со сгущением к поверхности океана для более точного описания верхнего деятельного слоя. Данная версия модели описана подробнее в работе [21].

В качестве данных о батиметрии использовались данные массива GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) [23] 2020 г. с пространственным разрешением 15". Для отдельных прибрежных районов (Обь-Енисейского бассейна, Чёшской губы) и акватории Карского моря использовались доступные данные батиметрических карт.

Для учета изменений уровня моря на открытой границе задавалась комбинация неперiodических колебаний уровня моря по данным глобального анализа и прогноза [24] европейской службы CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, marine.copernicus.eu) с пространственным разрешением $1 \setminus 12^\circ$ по долготе и широте и с дискретностью по времени 1 сут, в которых уровень моря рассчитывается без учета приливных и периодических колебаний уровня моря, восстанавливаемых по данным атласа ТРХО 9 (<https://www.tpxo.net>) [25].

Для подготовки начального состояния на момент начала прогностических расчетов (на 01.08.2022 г.) и для задания граничных условий на открытых («жидких») границах также использовались данные глобального анализа и прогноза CMEMS [24], которые интерполировались на сеточную область модели INMOM с использованием билинейной интерполяции.

Для задания атмосферного воздействия в модели INMOM использовались данные оперативных прогнозов, полученные с помощью атмосферной модели COSMO-Ru в версии ENA с пространственным разрешением 6.6 км (COSMO-Ru6) [26].

1.2. Усвоение данных наблюдений

Для модели INMOM в версии Западно-Арктических морей реализован алгоритм усвоения доступных спутниковых данных наблюдений SST и SIC по методу ансамблевой оптимальной интерполяции EnOI с использованием программного комплекса DART (Data Assimilation Research Testbed, <https://dart.ucar.edu/>) [27]. Система усвоения DART разработана и поддерживается Национальным центром атмосферных исследований США (National Center for Atmospheric Research, NCAR) и представляет собой комплекс программ с открытым исходным кодом (<https://github.com/NCAR/DART>). Модель INMOM совместно с DART уже использовалась для воспроизведения текущего состояния и краткосрочного прогноза СЛО и прилегающих к нему акваторий с пространственным разрешением ~ 3.7 км [28], а также для расчетов циркуляции Черного, Азовского и Мраморного морей [29].

Система усвоения DART интегрирована в модель INMOM в виде отдельного модуля. Методика усвоения с помощью системы INMOM–DART по методу ансамблевой оптимальной интерполяции EnOI заключается в следующем: сначала готовится ансамбль модельных состояний, далее в DART на основе полученного ансамбля и данных наблюдений

или доступных спутниковых данных рассчитывались поля анализа (скорректированные модельные состояния), которые использовались как начальные состояния для расчета краткосрочного прогноза по модели INMOM. Модельное состояние включало поля температуры, солёности, сплоченности и толщины морского льда. В качестве элементов ансамбля использовались состояния модели INMOM на дату прогноза, рассчитанные в ретроспективном режиме за период с 1997 г. по 2021 г. Количество элементов ансамбля полагалось равным 25 (включая данные текущего расчета). Более подробно эта методика описана в работе [29].

Для проведения ретроспективных расчетов (с 1997 по 2021 гг.) готовились начальные данные на первое августа каждого года: с 1997 по 2018 гг. включительно по данным глобального реанализа CMEMS [30], а с 2019 года по данным глобального анализа и прогноза CMEMS [24]. Длительность каждого из расчетов составляла 1 год и 1 месяц (с августа текущего года по сентябрь следующего года). Первый месяц исключался из рассмотрения и использовался в качестве т.н. «spin up». В расчетах использовался метод релаксации (т.н. «наджинг») к данным спутниковых наблюдений за температурой поверхности моря. В рамках данного метода выполнялась релаксация модельной температуры поверхности моря к спутниковым данным путем добавки их разности к нормированным потокам тепла на поверхности моря с коэффициентом релаксации $1.0e-05$ м/с. Это примерно соответствовало релаксации модельной температуры к данным наблюдений в 1-м слое за 1 сутки. В качестве спутниковых данных о температуре поверхности моря за период с 1997 г. по 2007 г. использовались данные CMEMS SST_GLO_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_001, а с 2007 г. — SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001 [31].

1.3. Спутниковые данные

В настоящей работе использовались среднесуточные глобальные спутниковые данные CMEMS о SST (SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001) [31] с разрешением 0.05° по широте и долготе. Этот массив данных представляет собой спутниковые данные, которые проходят дополнительную обработку и корректируются с учетом данных экспедиционных измерений и измерений с различных морских буев. В качестве данных SIC использовались данные AMSRE/AMSR2 (https://seaice.uni-bremen.de/data/amr2/asi_daygrid_swath/n6250/) [32], восстанавливаемые с помощью алгоритма ARTIST Sea Ice (ASI) и предоставляемые университетом Бремена в полярной стереографической проекции с разрешением 6.25 км.

1.4. Сценарии расчетов

Расчеты гидротермодинамических и ледовых характеристик проведены в квазиоперативном режиме (анализ и прогноз на последующие 24 часа) за период с 01.08.2022 г. по 01.10.2023 г. с совместным усвоением спутниковых данных наблюдений SST и SIC. Таким образом, подготовлено 426 ежедневных прогнозов от 00:00 UTC+0 с заблаговременностью 24 ч. Для старта каждого прогноза, кроме первого, использовалось модельное состояние, полученное на 24 ч. предыдущего прогноза. Данное модельное состояние, используемое в качестве начального состояния для последующего прогноза, корректировалось по методу ансамблевой оптимальной интерполяции EnOI раз в сутки (в 00:00 UTC+0). Ширина окна усвоения составляла 24 ч. При проведении расчетов усваивалось 25% спутниковых данных как SST, так и SIC. Дополнительно проведен сквозной расчет за тот же период по времени без усвоения данных наблюдений, необходимый для оценки точности и эффективности работы алгоритма усвоения.

2. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ SST С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМРП ДЛЯ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ

Баренцево и Карское моря (БМ и КМ) расположены в высоких широтах за полярным кругом с характерным полярным климатом с продолжительной зимой и коротким холодным летом [33]. БМ является пограничным между Атлантикой и СЛО. На его акваторию поступают теплые атлантические воды вместе с Нордкапским течением, которые существенным образом влияют на его ледовые условия и гидрологический режим. В зимний период БМ полностью не замерзает. КМ характеризуется более суровыми климатическими условиями. В осенне-зимний период КМ полностью замерзает, а в его северной части лёд, как правило, присутствует на протяжении всего года. Для того чтобы учесть различия гидрологического и ледового режимов КМ и БМ, оценка эффективности работы алгоритма усвоения проводилась для каждого из этих морей по отдельности.

На рис. 1 представлены среднемесячные карты SST для Западно-Арктических морей России для октября 2022 г. и июля 2023 г., построенные по результатам расчета без усвоения (NA), прогностических расчетов с усвоением (A) с заблаговременностью 24 ч. (на первый день прогноза) и по данным спутниковых наблюдений (SAT). Следует отметить, что в расчете A спутниковые данные по SST в Обской губе и Енисейском заливе не усваивались, что связано с наличием выявленных некорректных значений SST, например в июле 2023 г. (рис. 1). Для оценки корректности реализации процедуры усвоения также анализировалась времен-

ная изменчивость СКО модельных и спутниковых значений SST, рассчитанных по результатам расчетов A и NA относительно SAT и осредненного для всей акватории БМ и КМ соответственно за период с августа 2022 г. по сентябрь 2023 г. включительно (рис. 2). На рис. 2 представлены среднесуточные значения СКО. Прослеживается значительная сезонная изменчивость СКО, которая в основном связана с сезонными колебаниями SST на рассматриваемых акваториях и с процессами таяния и нарастания льда.

В осенний период 2022 г., по результатам расчета NA, SST существенно выше по сравнению с SAT. Однако с понижением SST в результате выхолаживания и осенне-зимней конвекции и соответственно с уменьшением диапазона изменений значений SST СКО уменьшается. Так, в БМ в расчете A СКО не превышает 0.8°C (в сентябре–октябре) и 0.5°C (в ноябре), а в NA уменьшается от 1.5°C в октябре до 0.7°C в конце ноября.

В зимний период СКО достигает минимальных значений как в БМ, так и в КМ. КМ полностью покрыто льдом, температура воды подо льдом близка к температуре замерзания воды ($\sim 1.5\text{--}1.8^{\circ}\text{C}$ в зависимости от солености приповерхностного слоя воды). Это приводит к изменению СКО в КМ в небольшом диапазоне от 0.4°C в декабре до 0.2°C в апреле–начале мая в расчетах A и NA соответственно. Центральная часть БМ в зимний период свободна ото льда, тем самым температура воды здесь меняется в более широком диапазоне от 0°C до 5°C и СКО, в свою очередь, меняется от 0.4°C до 0.5°C по результатам расчета A, и от 0.6°C до 0.8°C по результатам расчета NA.

В весенний период температура воздуха повышается, что приводит к таянию льда и повышению SST. В мае–июне происходит более быстрое смещение кромки льда в БМ и очищение ото льда юго-западной части КМ в расчете A по сравнению с NA. В июле в расчете NA большая часть акватории КМ покрыта льдом с SIC до 0.5–0.7, а в августе SST КМ существенно ниже, чем SAT. Это связано с более поздним освобождением акватории ото льда и, соответственно, меньшим влиянием потоков тепла из атмосферы. Это приводит к медленному прогреву верхнего слоя в расчете NA и, соответственно, к существенному росту СКО в КМ. Таким образом, в весенне-летний период в БМ СКО в целом меньше, чем в КМ, и не превышает 0.8°C в августе 2023 г. по результатам расчета A. В КМ максимум ошибки также достигается в августе 2023 г. и составляет 1.4°C в расчете A. В расчете NA СКО в БМ превышает 2.0°C , а в КМ — 3.2°C .

Отметим, что в настоящей работе не ставится цель точной калибровки параметров модели и оценки точности исходных данных. Рассматривается задача, в рамках которой анализируется возможность алгоритмов усвоения скорректировать модельное решение таким образом, чтобы приблизить его к наблюдаемым значениям. Поэтому задача выбора начального состояния, используемого для начала про-

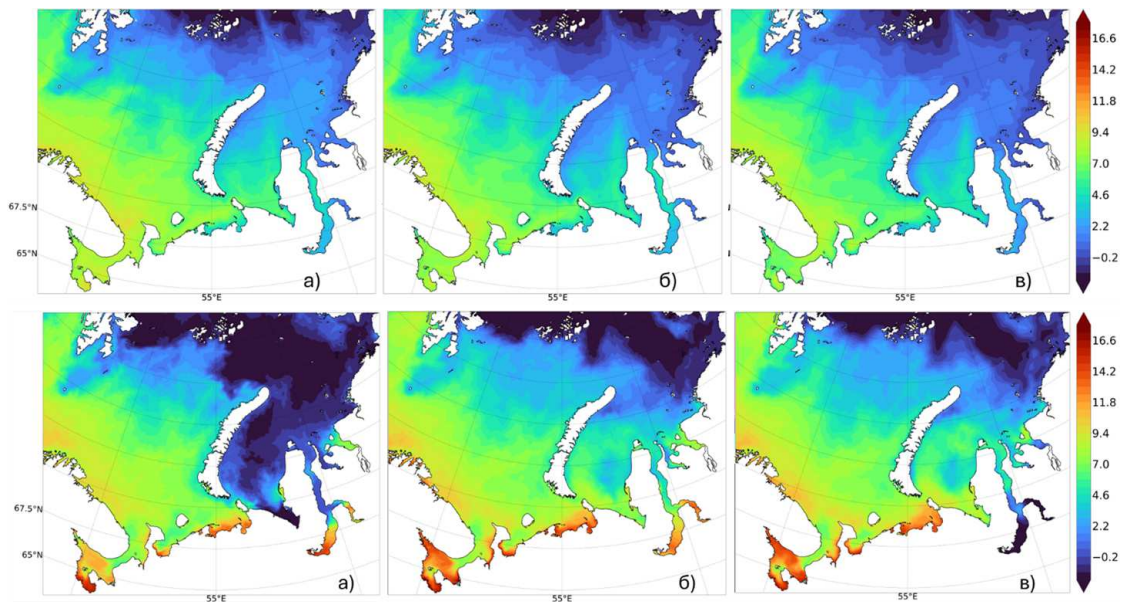


Рис. 1. Среднемесячные карты SST ($^{\circ}\text{C}$, цветовые шкалы справа) для октября 2022 г. (сверху) и июля 2023 г. (снизу), построенные по результатам расчета без усвоения NA (а), по результатам прогностических расчетов А с заблаговременностью 24 ч (б) и по данным SAT (в)

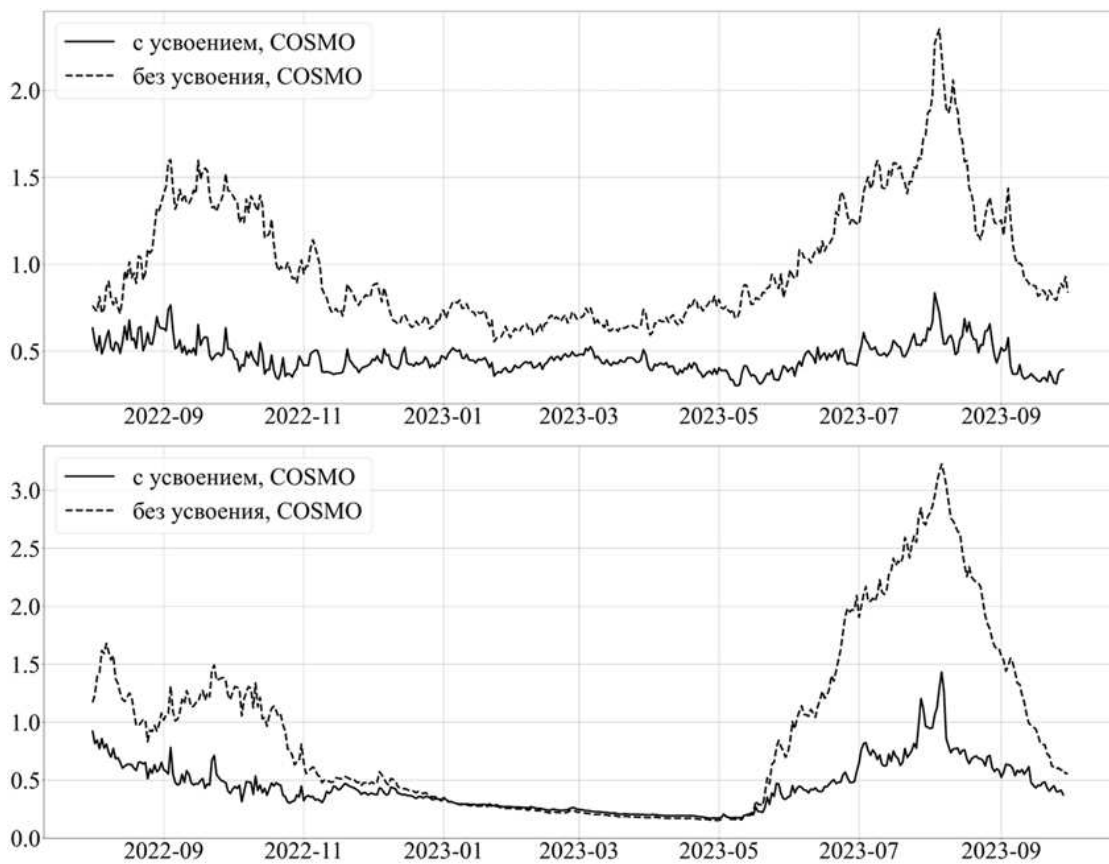


Рис. 2. Временной ход среднесуточных значений СКО SST ($^{\circ}\text{C}$) по результатам прогностических расчетов А с заблаговременностью 24 ч (жирная кривая) и расчета без усвоения NA (пунктирная кривая) в БМ (сверху) и КМ (снизу)

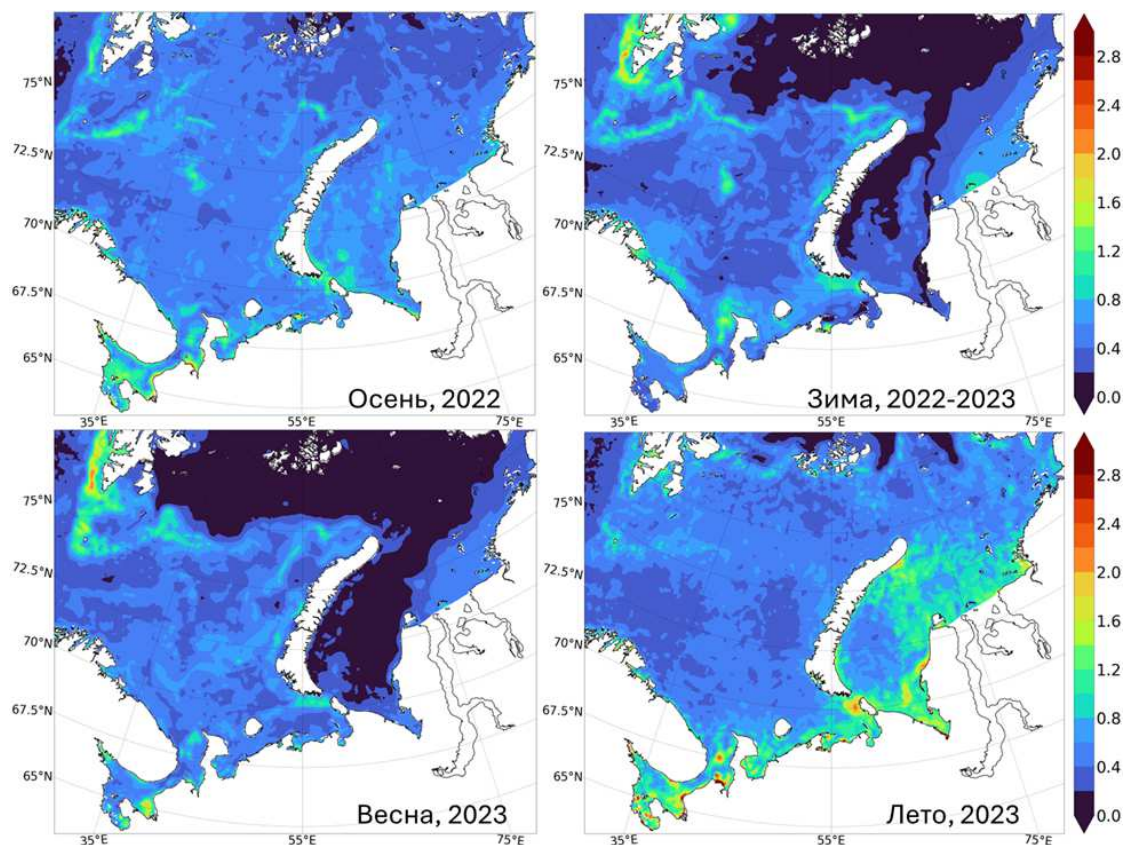


Рис. 3. Сезонная изменчивость СКО SST ($^{\circ}\text{C}$, цветовые шкалы справа) по результатам прогностических расчетов А с заблаговременностью 24 ч для 2022–2023 гг.

гностических расчетов (на 1 августа 2022 г.), и оценка его точности выходят за рамки настоящей работы.

Анализ сезонных площадных карт СКО (рис. 3), построенных по результатам расчета А и SAT, показывает, что на протяжении всего года наибольшие их значения наблюдаются преимущественно в прибрежных зонах (у западных берегов арх. Шпицберген, арх. Новая Земля, у Скандинавского п-ва), на входе в Белое море, а в зимний период — в прикромочных ледовых зонах. В этих районах значения СКО могут достигать $2.0\text{--}2.5^{\circ}\text{C}$. Довольно высокие значения СКО наблюдаются также в БМ в областях взаимодействия теплых атлантических вод (северная ветвь Нордкапского течения) с холодными арктическими водами — т.н. фронтальные зоны (ФЗ), для которых характерно наличие повышенных горизонтальных градиентов SST и её большая сезонная изменчивость. В БМ выделяют до 7 ФЗ, но в основном рассматривают Прикромочную (сезонную ФЗ, которая образуется в летний период у арх. Шпицберген и арх. ЗФИ за счет интенсивного таяния льда) и Полярную фронтальные зоны (квазистационарная, разделяет атлантические и арктические воды и пересекает центральную часть Баренцева моря с запада на восток, максимальные градиенты отмечаются в районе о. Медвежий) [34]. ФЗ, как правило, расположены на скло-

нах крупных поднятий и котловин: западные и восточные склоны Шпицбергенской банки, склоны Центральной возвышенности и Гусиной банки в восточной части БМ [35]. Здесь, за исключением летнего периода, СКО достигает $1.2\text{--}1.5^{\circ}$. В осенне-зимний период в районе Центральной возвышенности СКО достигает 1.2°C . В летний период в прибрежной зоне юго-восточной части БМ, в проливе Карские Ворота и в Байдарацкой губе СКО достигает 2°C , а в северных частях БМ и КМ вблизи кромки льда, где происходит его интенсивное таяние, СКО составляет $1\text{--}1.2^{\circ}\text{C}$. В КМ, по сравнению с SAT, выделяется наличие распресненных вод Обь-Енисейского бассейна.

3. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ SIC С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМРП ДЛЯ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ

В летний сезон 2022 г. и осенний сезон 2023 г. акватории БМ и КМ были практически полностью свободны ото льда. Анализ SAT о SIC показывает, что максимум ледовитости приходился на март-апрель. Минимальная площадь льда в морях наблюдалась в сентябре. На рис. 4 приведены среднемесячные карты SIC для Западно-Арктических морей России для ноября 2022 г. и июля 2023 г. Сред-

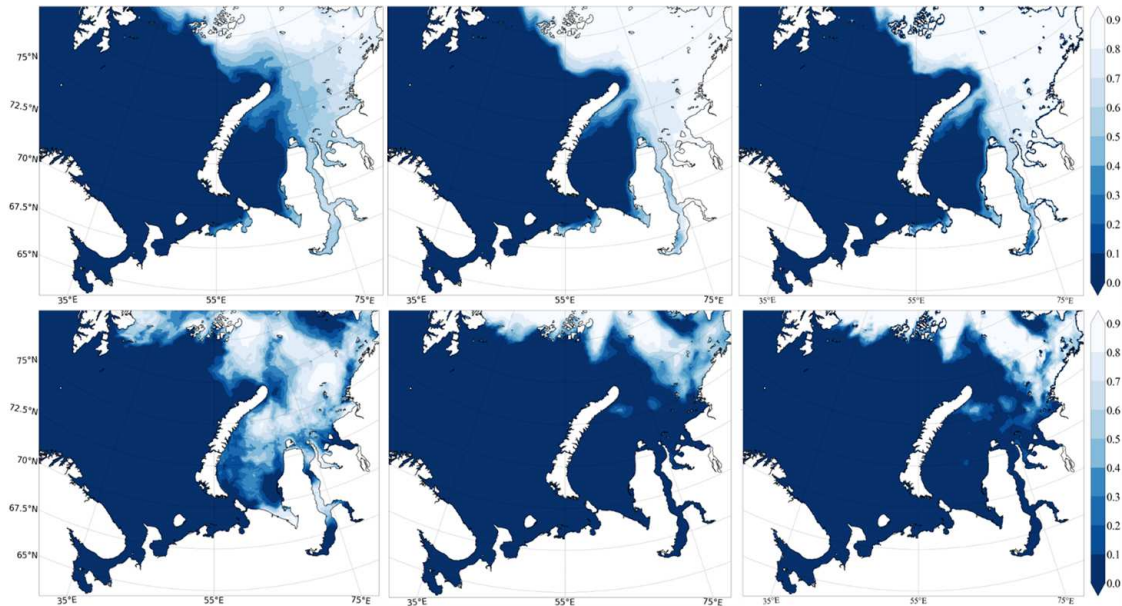


Рис. 4. Среднемесячные карты SIC (безразм., цветовые шкалы справа) для ноября 2022 г. (сверху) и июля 2023 г. (снизу) по результатам расчета без усвоения NA (а), прогностических расчетов А с заблаговременностью 24 ч. (б) и по данным SAT (в)

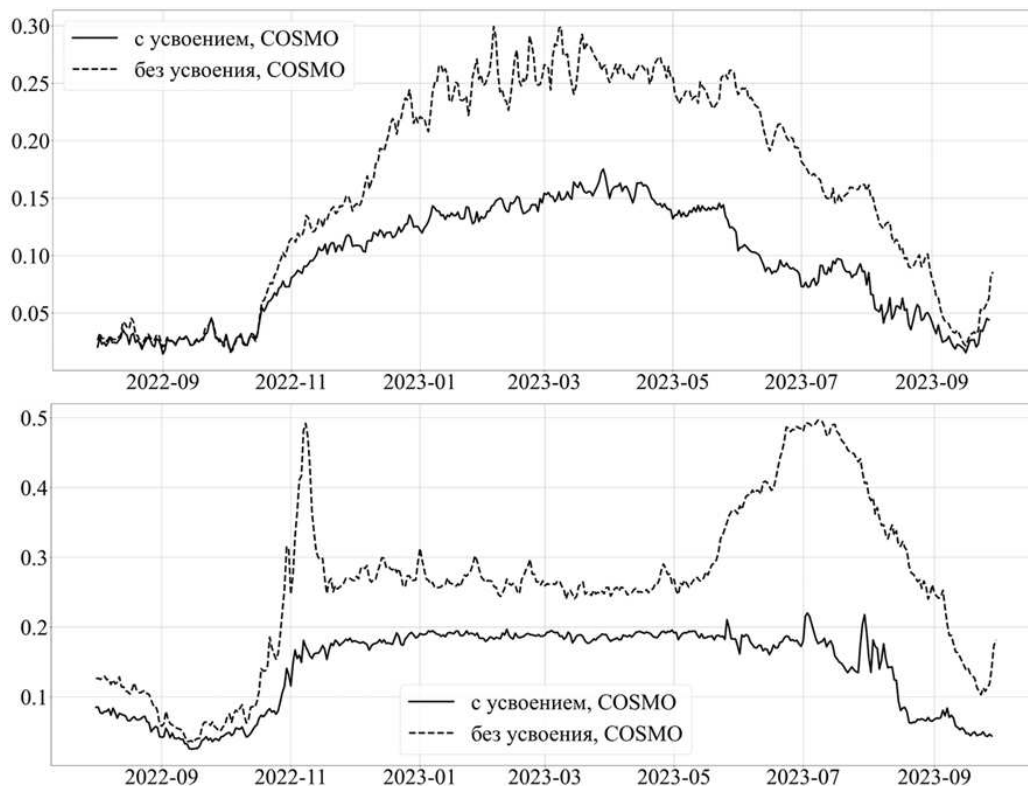


Рис. 5. Временной ход среднесуточных значений СКО SIC (безразм.) по результатам прогностических расчетов А с заблаговременностью 24 ч (жирная кривая) и расчета без усвоения NA (пунктирная кривая) в БМ (сверху) и КМ (снизу)

немесячные карты также строились по результатам расчета без усвоения (NA), прогностических расчетов с усвоением (А) с заблаговременностью 24 ч (на первый день прогноза) и по данным спутниковых наблюдений (SAT). Для определения СКО

SIC использовались данные SIC AMSRE/AMSR2, предоставляемые университетом Бремена (рис. 5). Следует отметить, что спутниковым данным в прибрежных областях свойственно завышать значения SIC. Поэтому при подготовке данных для усвоения

в модели морской циркуляции INMOM эти значения корректировались с учетом значений SST: если SST больше 0.2°C , считалось, что лёд отсутствует.

Начиная с середины сентября в КМ прослеживается рост СКО, что связано с началом ледообразования в северо-восточной части КМ. В ноябре акватория КМ, за исключением его центральной части, уже покрыта льдом. В конце ноября–начале декабря замерзает центральная часть КМ. В КМ по результатам расчета NA максимальное СКО SIC составляет 0.5 и наблюдается в начале ноября, так как без усвоения SST ледообразование начинается позже. Далее ошибка уменьшается и не превышает 0.3 на протяжении всего зимнего периода. По результатам расчета А СКО не превышает 0.2 также на протяжении всего зимнего периода. В БМ лед в основном образуется в его северной части, вдоль западных берегов арх. Новая Земля, а также в южной части моря. Кромка льда очень подвижна, что обусловлено интенсивным ветровым воздействием. Лишь в узкой прибрежной части на юге возможно становление припая. В расчете А СКО меняется от 0.05 в октябре до 0.18 в апреле, когда достигается максимум ледовитости, а в NA — также от 0.05 в октябре до 0.3 в апреле.

В мае начинается таяние льда в БМ, кромка льда смещается севернее и очищается акватория в его южной и юго-западной частях, а также вдоль западных берегов арх. Новая Земля. В расчете NA в БМ кромка льда расположена южнее и СКО достигает 0.25, в то время как в А СКО не превышает 0.15. Далее в июне–августе количество льда на акватории БМ сокращается, он наблюдается лишь на севере моря, и СКО не превышает 0.05 в расчете А и 0.1 в расчете NA в августе. В КМ активное таяние льда также начинаются в мае в юго-западной части и вдоль западных берегов арх. Новая Земля. В расчете NA в июне практически вся акватория КМ покрыта льдом и отсутствуют запримайные полыньи на выходе из Обской губы и Енисейского залива. В расчете А основные отличия от SAT наблюдаются в Байдарацкой губе. Так, СКО в расчете NA растет от 0.25 (май) до 0.5 (июль), а в расчете А — не превышает 0.2. В июле, согласно SAT и результатам расчета А, юго-западная часть КМ свободна ото льда, лед присутствует только в северо-восточной части КМ. В эксперименте NA практически вся акватория КМ покрыта льдом, что приводит к увеличению СКО (оно составляет 0.5). В августе происходит значительное сокращение ледовитости КМ по SAT, но, по результатам расчета NA, льды большой сплошности в северо-восточной части моря сохраняются и не успевают растаять. Результаты, полученные в расчете А, близки к наблюдаемым данным SAT. СКО достигает 0.2–0.3 в расчете NA, а в расчете А — 0.08. Полученные результаты показывают важность одновременного усвоения как данных по SST, так и данных по SIC. Усвоение и первой, и второй характеристик приводит к повышению точности расчета как SST, так и SIC. Второе крайне важно, т.к. потоки тепла из атмосферы

в океан при наличии/отсутствии ледяного покрова существенным образом отличаются. Таким образом, более корректный расчет ледяного покрова напрямую влияет на расчет потоков тепла и, в дальнейшем, на расчет SST. Верно и обратное, более точный расчет SST оказывает влияние на потоки тепла из океана в лёд, что регулирует процессы термического нарастания/таяния льда и, таким образом, как площадь льда, так и его кромка воспроизводятся более корректно.

Анализ сезонных площадных карт СКО SIC (рис. 6), построенных по результатам расчета А и SAT, показывает, что наибольшие ошибки СКО отмечаются в прибрежных областях в КМ и в юго-восточной части БМ, где ошибка в зимний и весенний периоды, а также в летний период в КМ, может достигать 0.2–0.3. Под действием ветров формируются области с интенсивной динамикой льда как в БМ, так и в КМ, для которых характерны ошибки в воспроизведении фазы наступления процессов таяния или ледообразования и где СКО достигает 0.3. В весенний период в прикромочных областях и в областях с интенсивным таянием льда СКО превышает 0.2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ результатов квазиоперативных расчетов за 2022–2023 гг. показал, что усвоение спутниковых данных SST и SIC в модели морской циркуляции INMOM позволяет значительным образом улучшить модельные прогнозы гидротермодинамических характеристик Западно-Арктических морей России и тем самым приблизить их к наблюдаемым.

По результатам проведенных расчетов (с усвоением А и без усвоения NA) прослеживается сезонная изменчивость СКО SST и SIC, осредненных по акватории БМ и КМ. В расчете NA в отдельные месяцы, за исключением холодного времени года, СКО SST превышает 1°C , среднее ее значение близко к 1°C . Наибольшие значения СКО SST наблюдаются в прибрежных областях, в зонах взаимодействия теплых атлантических вод с холодными арктическими водами, в областях интенсивного таяния льда. Усвоение позволяет скорректировать SST более чем на 0.46°C в Баренцевом море и 0.6°C в Карском море в среднем за период расчета, то есть повысить точность расчетов \sim на 80%. Результаты расчетов показывают, что ошибка непостоянна по времени и наблюдается ее сезонная изменчивость: в весенне-летний период происходит рост СКО SST как в БМ, так и в КМ, наибольшие значения СКО SST достигаются в августе. Это обусловлено сезонной изменчивостью SST, которая выше в летний период, а также связано с возможными ошибками в воспроизведении фаз нарастания и таяния морского льда. В летний период, в случае более медленного таяния льда, будет наблюдаться меньшая интенсивность в проникновении тепла в верхний

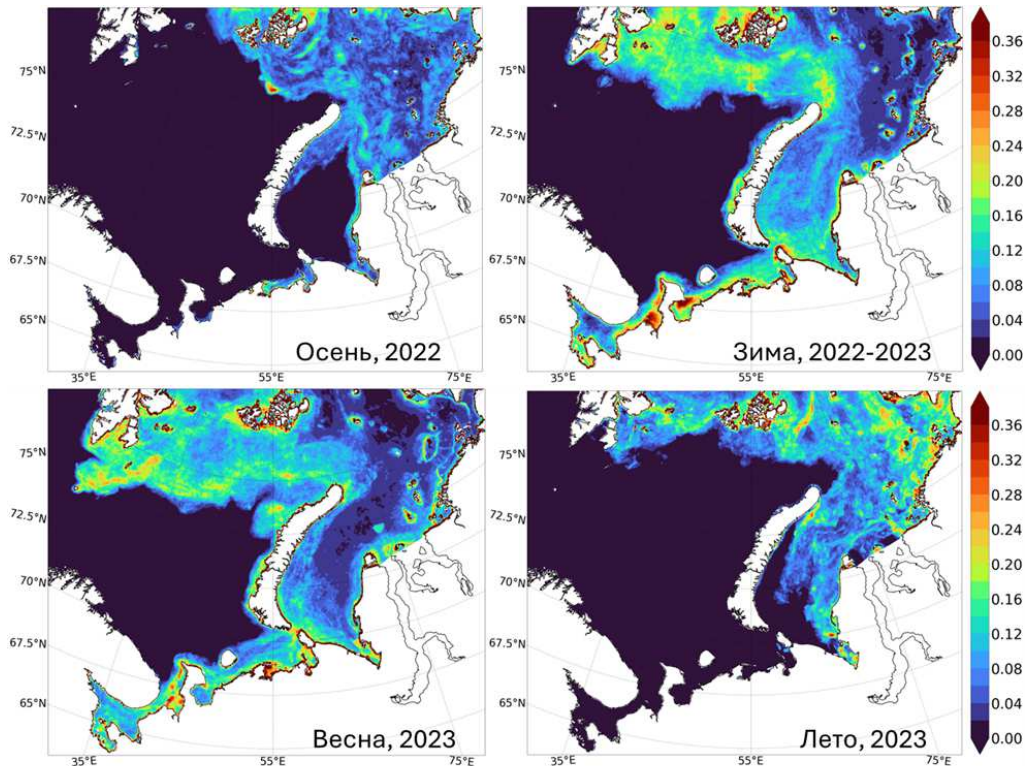


Рис. 6. Сезонная изменчивость СКО SIC (безразм., цветовые шкалы справа) по результатам прогностических расчетов А с заблаговременностью 24 ч. для 2022–2023 гг.

слой моря и, соответственно, более медленное, относительно наблюдаемого, повышение температуры воды. Следует предполагать, что в случае более быстрого таяния льда в модели будет наблюдаться более быстрый прогрев верхнего слоя моря и, соответственно, более быстрое, относительно наблюдаемого, повышение температуры воды.

Усвоение данных SIC позволяет значимым образом повысить точность расчета ледовых характеристик в прикромочных областях и в областях с интенсивным таянием льда. Так, в БМ СКО в период максимального развития льда уменьшается на 60–70%, а в КМ — на 40–50%.

В работе показана важность совместного усвоения как гидрологических, так и ледовых характеристик. Усвоение данных SST позволяет скорректировать результаты расчетов ледовых характеристик, и наоборот, усвоение ледовых характеристик позволяет повысить точность воспроизведения SST. Положительный эффект явным образом наблюдается в переходные сезоны, когда наблюдается интенсивное ледообразование/таяние льда. Возможные ошибки в фазе наступления процессов таяния или ледообразования приводят к некор-

ректному расчету потоков тепла, соли и импульса на границе вода–воздух с учетом ледовых условий (вода–лед–воздух). Усвоение повышает точность воспроизведения фаз ледовых условий, что приводит к уменьшению значений СКО SST на 70–80% относительно расчета NA в периоды активного изменения температуры. При этом вклад в уменьшение СКО при воспроизведении SST вносит как усвоение SST, так и усвоение SIC.

Исследование выполнено в рамках плана НИОКТР тема № АААА-А20-120021890121-5 (Разработка и усовершенствование моделей, методов и технологий прогнозирования гидрометеорологических характеристик акваторий Мирового океана, морей и морских устьев рек России). Разработка и адаптация модели циркуляции Западно-Арктических морей проводилась в рамках гранта РФФ № 22-17-00267 «Вихреразрешающее моделирование общей циркуляции океана и исследование физических аспектов вихревой изменчивости». Численные расчеты проведены на суперкомпьютере ХС40-LC ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» и на суперкомпьютере «Ломоносов-2».

[1] Shutyaev V.P., Zalesny V.B., Agoshkov V.I. et al. // *Journal of Marine Science and Engineering*. 11, N 6. 1253 (2023).

[2] Agoshkov V.I., Zalesny V.B., Shutyaev V.P. et al. // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 37 № 3. 131 (2022).

- [3] *Parmuzin E.I., Zalesny V.B., Agoshkov V.I., Shutyayev V.P. et al. // Radiophysics and Quantum Electronics. textbf63. 673 (2021).*
- [4] *Mogensen K., Balmaseda M.A., Weaver A.T. et al. // NEMOVAR: A variational data assimilation system for the NEMO model – ECMWF Newsletter, Summer Edition, 2009.*
- [5] *Moore A.M., Arango H.G., Broquet G. et al. // Prog. Oceanogr. textbf91. 74 (2011).*
- [6] *Красюк Т. В. et al. // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ. № 348. С. 43–60 (2012).*
- [7] *Степанов В.Н., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зеленко А.А. // Метеорология и гидрология. № 2, 50 (2021). (Stepanov V., Resnyanskii Yu.D., Strukov B.S., Zelenko A.A. // Russian Meteorology and Hydrology, 46, № 2, 94 (2021).)*
- [8] *Sakov P., Sandery P.A. // Ocean Modelling. 89. 45 (2015).*
- [9] *Kaurkin M.N., Ibrayev R.A., Belyaev K.P. // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 54. 56 (2018).*
- [10] *Van Leeuwen P.J. // Monthly Weather Rev. 137. 4089 (2009).*
- [11] *Belyaev K., Kuleshov A., Smirnov I., Tanajura C.A.S. // Mathematics. 9, № 19, 4089. (2021).*
- [12] *Weaver A.T., Vialard J., Anderson D.L.T. // Mon. Wea. Rev. 131. 1360 (2003)*
- [13] *Zhuang S.Y., Fu W.W., She J. // Ocean Sci. 7. 771 (2011)*
- [14] *Kalnay E., Li H., Miyoshi T. et al. // Tellus. 59A. 758 (2007).*
- [15] *Попов С.К., Лобов А.Л., Елисов В.В., Батов В.И. // Метеорология и гидрология. №6, С. 68–82 (2013). (Popov S.K., Lobov A.L., Elisov V.V., Batov V.I. Russian Meteorology and Hydrology. 38. 414 (2013).)*
- [16] *Кулаков М.Ю., Махитас А.П., Шутимин С.В. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2, № 92. 6 (2012).*
- [17] *Sakov P., Counillon F., Bertino L. et al. // Ocean Science. 8, № 4. 633 (2012).*
- [18] *Rohrs J., Gusdal Y., Rikardsen E.S.U. et al. // Geosci. Model Dev. 16. 5401 (2023).*
- [19] *Дианский Н. А. // Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.*
- [20] *Moshonkin S., Zalesny V., Gusev A. // J. Mar. Sci. Eng. 6. 95 (2018).*
- [21] *Дианский Н.А., Панасенкова И.И., Фомин В.В. и др. // Морские информационно-управляющие системы. 17. 44 (2020).*
- [22] *Яковлев Н.Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 45, № 3, 383–398 (2009). (Yakovlev N.G. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 45. 357 (2009))*
- [23] *Becker J.J., Sandwell D.T., Smith W.F. et al. // Marine Geodesy. 32, № 4. 355 (2009).*
- [24] *Global Ocean Physics Analysis and Forecast. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS).*
- [25] *Egbert G.D., Erofeeva S.Y. // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 19(2). 183 (2002)*
- [26] *Ривин Г.С., Багров А.Н., Розинкина И.А. и др. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. № 49. 57 (2022)*
- [27] *Anderson J.L., Hoar T., Raeder K. et al. // Bulletin of the American Meteorological Society. 90. 1283 (2009).*
- [28] *Фомин В.В., Панасенкова И.И., Гусев А.В. и др. // Арктика: экология и экономика. 11, № 2. 205 (2021).*
- [29] *Фомин В.В., Дианский Н.А. // Метеорология и Гидрология. 48, № 2. 15 (2023). (Fomin V.V., Diansky N.A. Russian Meteorology and Hydrology. 48, issue 2. 97 (2023)).*
- [30] *Global Ocean Physics Reanalysis. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS).*
- [31] *Good S., Fiedler E., Mao C. // Remote Sens. 12. 720 (2020).*
- [32] *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. // J. Geophys. Res. 113. C02S03 (2008).*
- [33] *Добровольский А. Д., Залогин Б. С. // Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.*
- [34] *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 01. Баренцево море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / Ф.С. Терзиев и др. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 280 стр.*
- [35] *Система Баренцева моря / под ред. академика А. П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. 672 с.*

Reproduction of hydrothermodynamic characteristics of the Russian Western Arctic Seas with assimilation of sea surface temperature and sea ice concentration data

I. I. Panasenkova^{1,2a}, V. V. Fomin^{1,2,3b}, N. A. Diansky^{1,2,3,4c}

¹N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow 119034, Russia

²Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, Moscow 123242, Russia

³Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the RAS, Moscow 119333, Russia

⁴Department of Physics of Sea and Land Waters, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: ^a*ipanasenkova@mail.ru*, ^b*vladimirfomin@live.com*, ^c*nikolay.diansky@gmail.com*

Accurate forecasting of meteorological, hydrothermodynamic and ice characteristics in the Russian Western Arctic Seas using atmospheric circulation, marine circulation and sea ice models is currently impossible without assimilation of observational data. It improves the quality of the initial model state including hydrophysical and ice characteristics for carrying out forecasts. In this paper we present a technique for assimilation of sea surface temperature (SST) and sea ice concentration (SIC) satellite data in the INMOM marine circulation model using the DART (Data Assimilation Research Testbed) software with an assessment

of the correctness of the assimilation algorithm used. A comparative analysis of the forecasts' accuracy of the hydrothermodynamics reproduction with the assimilation of SST and SIC satellite data and without assimilation is carried out. It is shown that satellite data assimilation reduces the RMSE of the forecasts and observational data by 80% for SST and by 60–80% for SIC compared to the simulation without assimilation. Temporal variability of the RMSE in the SST and SIC forecasts shows that their largest errors are observed during the periods of intense heating of the upper sea layer and ice melting. The importance of joint SST and SIC data assimilation is noted: a more accurate reproduction of SST improves the accuracy of calculations of heat and salt fluxes at the ocean-ice boundary, which regulate the processes of thermal accretion/melting of ice, and, as a result, the reproduction of the ice area and its edge is improved. In turn, a more correct SIC calculation directly improves the accuracy of heat flux calculations at the water-air boundary and, thereby, SST improves.

PACS: 92.10.-c.

Keywords: Barents Sea, Kara Sea, assimilation techniques, EnOI, satellite data.

Received 16 October 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Панасенкова Ирина Игоревна — науч. сотрудник; e-mail: ipanasenkova@mail.ru.
2. Фомин Владимир Васильевич — зав. лабораторией; e-mail: vladimirfomin@live.com.
3. Дианский Николай Ардальянович — доктор физ.-мат. наук, профессор; вед. науч. сотрудник; зав. отделом; e-mail: nikolay.diansky@gmail.com.