

ОКЕАНОЛОГИЯ OCEANOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-378-395>

УДК 551.467



Результаты прогноза гидрометеорологических полей для Белого моря с использованием системы атмосфера – океан – лед

Н.Ю. Бутаков[✉], К.Г. Рубинштейн, Р.Ю. Игнатов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

[✉]butakov@ibrae.ac.ru

Аннотация. С учетом активного освоения Арктики при крайне редкой сети наблюдений существует высокая потребность в надежных гидрометеорологических прогнозах ледовой, морской и метеорологической обстановки в данном регионе. С этой целью была реализована система гидрометеорологического прогноза параметров циркуляции атмосферы, океана и состояния морского льда для района Белого моря. В качестве модели прогноза циркуляции атмосферы в работе использовалась полярная версия модели WRF, в качестве модели прогноза циркуляции океана (моря) — модель ROMS, параметры состояния морского льда считались при помощи модели CICE. Были получены первые результаты расчета гидрометеорологических параметров полей и проведена оценка качества расчетов, что помогло выявить достоинства и недостатки использованной системы. Для атмосферных расчетов ошибки находятся на уровне или ниже опубликованных оценок из аналогичных работ, где используется PWRP для моделирования в полярных регионах. Поля температуры поверхности моря, поверхностной солёности и уровня океана хорошо согласуются с данными анализа GOFS 3.1 и находятся на уровне оценок качества других авторов. Были выявлены неточности в воспроизведении приведенных характеристик на границе лед — открытая вода. Для температуры поверхности моря ошибки на границе лед — открытая вода достигали 0,4 °C, по солёности 0, 4 ‰, скорости течений до 0,18 м/с, уровня 0,2 м. Был проведен сравнительный анализ двух схем параметризаций термодинамики льда в модели CICE — BL99 и Mushy. Показано, что при использовании обеих схем наблюдалась систематическая переоценка общего объема морского льда, но в сравнении со схемой Mushy более простая схема BL99 имела меньшие ошибки.

Ключевые слова: прогноз морского льда, циркуляция океана, циркуляция атмосферы, Белое море, Арктика, численное моделирование, термодинамика льда

Для цитирования: Бутаков Н.Ю., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю. Результаты прогноза гидрометеорологических полей для Белого моря с использованием системы атмосфера – океан – лед. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):378–395. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-378-395>

Поступила 01.12.2024

После переработки 20.08.2025

Принята 16.10.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Results of forecasting hydrometeorological fields for the White Sea using the atmosphere – ocean – ice system

Nikita Yu. Butakov✉, Konstantin G. Rubinstein, Roman Yu. Ignatov

Nuclear Safety Institute of the Russia Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉butakov@ibrae.ac.ru

Abstract. Given the active development of the Arctic with an extremely rare network of observations, there is a high demand for reliable hydrometeorological forecasts of the ice, marine and meteorological conditions in this region. For this purpose, a system has been implemented for hydrometeorological forecasting of atmospheric, ocean and sea ice circulation parameters for the White Sea region. The polar version of the WRF model was used for predicting atmospheric circulation, the ROMS model was used for predicting ocean (sea) circulation, and the parameters of the sea ice state were calculated using the CICE model. Early results of calculating hydrometeorological parameters have been obtained and an assessment of the quality of calculations has been carried out, which helped to identify the advantages and disadvantages of the system used. For the atmospheric calculations, the errors are at or below the published estimates from similar papers. The fields of sea surface temperature, surface salinity, and ocean level are in good agreement with the GOFS 3.1 analysis data and are at the level of other authors' quality assessments. Inaccuracies have been identified in the reproduction of the above characteristics at the ice /open water boundary. For the sea surface temperature, errors at the ice /open water boundary reached 0.4 °C, for salinity 0.4 ‰, for current velocity up to 0.18 m/s, and a level of 0.2 m. A comparative analysis was carried out for two schemes of parameterization of ice thermodynamics in the CICE — BL99 and Mushy models. It is shown that when both schemes are used, a systematic overestimation of the total volume of sea ice is observed. However, compared to the Mushy scheme, the simpler BL99 scheme had fewer errors.

Keywords: Sea ice forecast, ocean circulation, atmospheric circulation, White Sea, Arctic, numerical modeling, ice thermodynamics

For citation: Butakov N.Yu., Rubinstein K.G., Ignatov R.Yu. Results of forecasting hydrometeorological fields for the White Sea using the atmosphere – ocean – ice system. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):378–395. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-378-395>

Received 01.12.2024

Revised 20.08.2025

Accepted 16.10.2025

Введение

С отступлением морских льдов Арктика становится более доступной для судоходства — все большее значение приобретает Северный морской путь. Надежные прогнозы ледовой обстановки, океанической и атмосферной циркуляции могут помочь предотвратить аварии, снизить транспортные расходы и обеспечить безопасность маршрутов. Надежные прогнозы состояния океана, криосферы и атмосферы могут помочь в решении существующих радиационно-экологических проблем арктической зоны, поскольку в настоящее время на дне морей северо-западной Арктики находятся около 18 тысяч затопленных объектов различной степени радиационной опасности [1]. В дополнение ко всему за северным полярным кругом действуют Кольская и Билибинская АЭС, а также плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов». Все изложенное подтверждает важность реализации системы прогноза циркуляции океана, криосферы и атмосферы для Арктического региона.

Сравнение глобальных моделей океана и морского льда проводили в рамках проекта ОМIP-2 (часть CMIP6) [2] для оценки воспроизведения современного климата океана и ледяного покрова при использовании единого атмосферного форсинга и унифицированного протокола. Эксперименты выполнялись в течение 61-летних

циклов. Результаты сравнивались с современными наблюдениями: спутниковыми данными по температуре поверхности моря и солёности на поверхности моря. Сравнение проводилось на стандартной сетке $1^\circ \times 1^\circ$ и включало метрики BIAS и RMSE.

Для улучшения прогнозов толщины льда широко применяют методы ассимиляции данных спутников. Так, авторы [3] реализовали ассимиляцию измерений CryoSat-2 [4] в модель морского льда CICE [5], сопряжённую с океанической моделью NEMO [6]. Моделирование охватывало период 2010–2020 гг., совпадающий с фазой активных наблюдений CryoSat-2. Верификацию модели проводили с использованием независимых данных ICESat-2 [7], Operation IceBridge [8] и буев. Сравнение показало, что включение спутниковых данных позволяет уменьшить систематическую ошибку толщины на 0,1–0,3 м и снизить среднеквадратическую ошибку на 10–25 %, особенно в периферийных морях Арктики. Таким образом, работа продемонстрировала эффективность ассимиляции данных CryoSat-2 для улучшения пространственных распределений и сезонной изменчивости толщины льда.

Точность краткосрочных прогнозов дрейфа морского льда в Арктике оценивали также с использованием сопряжённой модели океана и льда [9], для чего была применена система PIOMAS (Pan-Arctic Ice–Ocean Modeling and Assimilation System) [10], объединяющая трехмерную модель океанической циркуляции и динамико-термодинамическую модель морского льда. Моделирование выполняли в прогностическом режиме с различной заблаговременностью — от 24 до 120 часов, а верификацию проводили на основе сравнения с наблюдениями за дрейфом льда, полученными из спутниковых данных и данных буев. Было отмечено, что наибольшие затруднения связаны с прогнозированием слабых ветров и условий в периферийных морях, где динамика льда наиболее изменчива. Также было продемонстрировано, что сопряжённые модели океана и льда способны обеспечивать полезные прогнозы дрейфа на несколько суток вперед, но сохраняют значительные ограничения при увеличении заблаговременности и в условиях сложной пространственной изменчивости.

Для Антарктиды и Южного океана исследовали [11] применение и оценку полярной версии модели WRF [12] (далее PWRF). Проведенные численные эксперименты были направлены на тестирование производительности региональной атмосферной модели в условиях полярных широт. Период моделирования охватывал 2017 год, что обеспечивало возможность оценки сезонных особенностей воспроизведения атмосферных полей. Верификацию проводили с использованием спутниковых наблюдений, радиозондов и станционных данных. Анализ показал, что PWRF в целом адекватно воспроизводит пространственное распределение атмосферных параметров, хотя в ряде случаев отмечались систематические смещения, в частности недооценка температуры и завышение скорости ветра в прибрежных районах. Был сделан вывод, что модель в текущей конфигурации является надежным инструментом для региональных исследований атмосферы в высоких широтах, но требует дополнительных улучшений параметризаций облачности и турбулентного обмена.

В отличие от рассмотренных исследований, наша работа имеет иной масштаб и цели. Так, в рамках ОМIP-2 внимание было сосредоточено на глобальных многолетних климатических экспериментах, выполняемых на сетке с разрешением порядка 1° и направленных на оценку долгосрочных трендов океанической и ледовой динамики [2]. Наша же модель ориентирована на регион Арктики и обладает существенно более высоким разрешением (6 км по горизонтали, 30 уровней по

вертикали), что позволяет анализировать мелкомасштабные процессы, но в пределах ограниченного района и короткого прогностического периода. Работа [3] была посвящена улучшению оценки толщины морского льда за счет ассимиляции спутниковых данных CryoSat-2, что обеспечивает точность климатических реконструкций, тогда как в нашей работе ассимиляция данных пока не используется, но предполагается в развитии. В исследовании [9] использовалась модель PIOMAS с пространственным разрешением около 25 км для проверки краткосрочного прогноза дрейфа льда [9]; наша модель имеет более детализированную сетку, а атмосферный форсинг задавался по данным PWRF, в отличие от использованных ими глобальных реанализов. Наконец, в [11] тестировали PWRF в условиях Антарктики и Южного океана, выявляя особенности атмосферных процессов и ошибки модели в ретроспективных расчетах, тогда как мы применяем прогноз PWRF непосредственно для задания атмосферного форсинга в региональной океанической модели Арктики. Таким образом, в отличие от глобальных и ретроспективных исследований, наша работа направлена на разработку и оценку системы оперативного прогноза океанических и ледовых характеристик Арктики с использованием региональной конфигурации с более высоким пространственным разрешением и актуальных атмосферных расчетов.

В отечественной науке исследования, посвященные численному моделированию гидрометеорологических процессов в арктических морях России, последовательно развивались от первых комплексных систем прогноза до современных высокоразрешающих моделей, способных воспроизводить как экстремальные события, так и долговременные климатические тенденции. В работе [13] представлена система оперативного диагноза и прогноза (СОДиП), созданная в ГОИН и ИВМ РАН, и проведена ее апробация для задач прогнозирования морской ледовой обстановки. Система включала региональную атмосферную модель WRF, океаническую модель INMOM и российскую атмосферно-волновую модель PABM. Такой комплекс позволял воспроизводить ключевые гидрометеорологические характеристики Карского и Печорского морей. Численные эксперименты охватывали безледный период 2003–2012 гг. и показали хорошее согласие расчетов с данными наблюдений: коэффициент корреляции по атмосферному давлению составил $\sim 0,999$, а по скорости ветра — 0,8–0,91. Полученные результаты продемонстрировали возможности комплексного моделирования атмосферы, океана и волн в арктических условиях.

Дальнейшее развитие системы СОДиП было представлено в обновленной версии, которая охватывала не только Карское и Печорское, но также Баренцево и Белое моря [14]. Усовершенствованная система отличалась увеличенным пространственным разрешением моделей (до 2,7 км для INMOM), расширенной расчетной областью и реализованной возможностью как ретроспективных, так и оперативных прогнозов до трех-пяти суток. На примере воспроизведения экстремального шторма января 1975 г. в Баренцевом море продемонстрированы возможности системы: расчеты адекватно описали поля ветра, волнения, течений и ледовых условий. Максимальная высота волн достигала 7,8 м, что совпадало с данными наблюдений. Важным результатом стало понимание вклада ветровой составляющей в формирование течений и изменений ледовой обстановки. Было показано, что разработанные комплексные системы способны не только описывать общую динамику, но и моделировать редкие и опасные экстремальные явления, что имеет ключевое значение для обеспечения безопасности деятельности в Арктике. Наша постановка работы близка к данной.

Дальнейший шаг в развитии подходов связан с переходом к более высокому пространственному разрешению, что позволило точнее воспроизводить локальные процессы в прибрежной зоне. В [15] использовали атмосферную модель COSMO-CLM с шагом порядка 3 км. Это дало возможность описывать сложные мезомасштабные структуры циркуляции, которые невозможно корректно воспроизвести с помощью глобальных реанализов или более грубых региональных моделей. Среди таких структур — мысовые струи, подветренные бури, вихревые цепочки в шхерах и локальные ветровые тени. Включение столь детализированного атмосферного форсинга в гидродинамические модели WAVEWATCH III [16] и ADCIRC [17] позволило уточнить характеристики волнения и штормовых нагонов в прибрежной зоне Карского моря. Многолетние расчеты выявили, что экстремальные нагоны (до 2,5 м) чаще всего формируются в Обской губе, где их частота примерно в два раза выше, чем в Байдарацкой. При этом в двух акваториях наблюдаются противофазные тренды по числу нагонов, что указывает на связь с изменениями розы ветров. Было показано, что использование атмосферных моделей с шагом в несколько километров является необходимым условием для адекватного воспроизведения экстремальных процессов в прибрежной зоне Арктики. В развитии наших работ мы предполагаем увеличение разрешения для прогнозов в проливах. Численные эксперименты по Баренцеву морю показали, что учет волновых параметров в параметризациях шероховатости поверхности изменяет турбулентные тепловые потоки между океаном и атмосферой в среднем на 1–3 % ($\approx 1\text{--}3 \text{ Вт/м}^2$) в обычных условиях [18]. Во время штормов относительная чувствительность возрастает до 3–5 %, а абсолютная разница может достигать 100–250 Вт/м² для экстремальных условий.

Таким образом, представленные работы демонстрируют заметный прогресс подходов: от первых комплексных систем диагностики и прогноза, позволивших воспроизвести основные черты циркуляции и взаимодействия атмосферы, океана и волн, к исследованиям, посвященным изменению ледового режима Северного морского пути, затем — к высокоразрешающему моделированию мезомасштабных процессов в прибрежной зоне и, наконец, к анализу долговременных климатических тенденций.

Используемая в нашей работе прогностическая система состоит из 2 отдельных блоков: 1) атмосферного, представленного в данной работе хорошо зарекомендовавшей себя моделью WRF [12], модифицированной для моделирования в полярных регионах, и 2) океанического, представленного моделями океана ROMS [19] и морского льда CICE [5], объединенными в совместную систему ROMS-CICE. Все выбранные нами модели, включая модель PWRF, открыты и доступны в сети Интернет. Доступны также все их модификации и обновления, которые хорошо документированы.

Целью данной работы была реализация системы прогноза температуры моря, солености моря, уровня, скорости и направления течений, толщины, сплоченности, скорости и направления дрейфа льда, а также таких атмосферных характеристик, как температура воздуха и температура точки росы на высоте 2 м, количество выпавших осадков, скорость и направление приземного ветра для Белого моря.

Методы исследования

В качестве объекта исследования для тестирования прогностической системы был выбран регион Белого моря, поскольку для него меньше открытых границ и больше, чем для большинства акваторий Арктики, метеорологических станций для оценки качества прогнозов.

Мы остановили свой выбор на модели морского льда CICE в связке с океанической моделью ROMS, т. к. модель CICE продемонстрировала более высокую точность в большинстве субрегионов на основе проведенного сравнительного анализа двух моделей морского льда CICE и Budgell с использованием в качестве океанического компонента совместной системы модели ROMS для оценки их точности в моделировании морского льда в Арктике [20]. При сравнении анализировали сплоченность морского льда и его толщину, а в качестве критериев оценки качества использовали коэффициенты корреляции и центрированные среднеквадратичные ошибки (CRMSE). Код этих моделей постоянно обновляется, и есть возможность совместной работы с моделью WRF по примеру того, как это было показано в работе [21].

В качестве атмосферного форсинга в моделях ROMS и CICE использовали посчитанные при помощи PWRF компоненты скорости ветра, приземное давление, относительную влажность, температуру воздуха на высоте 2 м, осадки, а также приходящую длинноволновую и коротковолновую радиацию. Модель PWRF была использована, так как GFS имеет относительно грубое пространственное разрешение (> 10 км для оперативной версии), что не позволяет адекватно воспроизводить мелкомасштабные процессы в Белом море: локальные бризы (морские/береговые), взаимодействие атмосферы со сложным рельефом побережья и т. д. К тому же в случае использования PWRF есть возможность более тонкой настройки модели для рассматриваемого региона в дальнейшем. Важной является также возможность сопряжения PWRF с ROMS и CICE.

Из модели ROMS в модель CICE передавались температура моря, соленость, компоненты скорости течений и динамический уровень. Из модели CICE в модель ROMS передавались напряжение лед–океан, потоки тепла, солёности и воды.

На *первом этапе* работы был произведен расчет атмосферных полей с помощью модели PWRF. После чего на *втором этапе* работы с использованием полученных атмосферных полей в качестве атмосферного форсинга был произведен расчет океанических параметров и параметров морского льда по совместной модели ROMS-CICE.

Шаг вычислительной сетки для моделей PWRF, ROMS и CICE 6 км. Сетки для всех трех моделей идентичны для избежания ошибок интерполяции.

Период моделирования для атмосферы, океана и льда был выбран с 01.01.2023 по 03.02.2023 — всего 8 расчетов с заблаговременностью 120 часов с датами инициализации модели 01.01.2023, 05.01.2023, 09.01.2023, 13.01.2023, 17.01.2023, 21.01.2023, 25.01.2023, 29.01.2023 за 00 UTC. Шаг по времени для всех трех моделей 30 с. Начальные и граничные условия для модели PWRF были получены из данных глобальной модели GFS [22]. Для моделей ROMS и CICE начальные и граничные условия были получены из данных глобальной модели HYCOM-CICE [23]. Начальные условия соответствовали заблаговременности прогноза HYCOM-CICE 12 ч. Атмосферные поля считались на 40 вертикальных уровнях, а океанические — на 30. При расчете льда использовали 7 вертикальных уровней с 5 категориями толщины льда.

Выбор параметризаций для модели PWRF в данном исследовании опирался на широкий спектр работ по тестированию PWRF в полярных регионах [11]. В качестве параметризации микрофизики была выбрана двухмоментная схема Моррисона [24]. Коротковолновую и длинноволновую радиацию параметризовали по схеме RRTMG [25], пограничный слой — по схеме MYNN Level 2.5 [26], приземный слой — по схеме MYNN [27]. Для описания поверхностного слоя земли была выбрана схема Noah-MP [28]. Конвекцию считали с использованием схемы параметри-

зации Каина–Фрича [29]. Для описания вертикального турбулентного перемешивания в модели ROMS использовалась схема GLS (Generic Length Scale) [30].

Моделирование морского льда было выполнено с двумя разными схемами термодинамики, используемыми для моделирования вертикального теплового баланса и эволюции льда. Первая схема, схема Bitz и Lipscomb (далее BL99) [31], представляет собой энергосохраняющий многослойный подход. В ней корректируются теплоемкость и теплопроводность льда с учетом наличия солевых включений. Скрытая теплота, связанная с таянием или замерзанием рассола, учитывается так, чтобы сохранялся полный баланс энергии. BL99 решает уравнение теплопроводности по вертикали численно устойчивым методом и позволяет описывать сезонный ход температуры льда и толщину покрова. Однако в данной схеме соленость льда, как правило, задается априорно (в виде постоянного профиля) и не является прогностической переменной. Механизмы удаления соли (гравитационный дренаж, промывка талой водой и образование ледо-снежного слоя) явно не моделируются, а влияние океанических условий подо льдом учтено через граничные условия на нижней поверхности. Основные достоинства BL99 — простота, относительная вычислительная экономичность и корректный учет баланса энергии. Ограничения — отсутствие прогноза эволюции солености и связанных с ней процессов.

Во второй схеме, «многофазной» схеме (далее Mushy) [32], морской лед рассматривается как двухфазная пористая среда, состоящая из твердой ледяной матрицы и жидкой рассольной фазы. Прогнозируются как температура (энтальпия), так и объемная соленость, а фазовое равновесие задается через кривую ликвидуса, связывающую температуру, соленость и долю жидкой фазы. В результате модель способна описывать процессы опреснения льда: гравитационный дренаж рассола и размывание талой водой. Такие механизмы определяют эволюцию солености, пористости и теплопереноса, а также влияют на механические свойства льда и его взаимодействие с океаном. Эта схема более сложна численно, что повышает вычислительную нагрузку. Однако физическая обоснованность выше: она позволяет воспроизводить наблюдаемые изменения солености и структуры льда в течение сезона и при изменении гидрологических условий.

Таким образом, в BL99 прогностической переменной является температура, а соленость задается; в Mushy схеме прогностическими являются и температура, и соленость. Первая учитывает скрытую теплоту и корректирует энергетический баланс, но не моделирует перенос соли. Вторая описывает перенос соли и эволюцию пористости. По вычислительным затратам BL99 проще и подходит для долгосрочных климатических расчетов, Mushy сложнее, но обеспечивает более полное физическое описание процессов. BL99 дает корректный баланс энергии и сезонный цикл толщины льда, однако менее чувствительна к изменениям солености. Mushy схема позволяет воспроизводить наблюдаемые процессы опреснения и лучше описывает внутреннюю структуру льда.

Нами были получены оценки качества расчета атмосферных параметров, параметров состояния океана и параметров состояния морского льда. Причем первые 24 часа после каждой инициализации модели для анализа не использовали, так как это время на согласование моделей. Атмосферные параметры оценивались с помощью пакета инструментов MET (Model Evaluation Tools) [33]. Была произведена оценка качества прогноза приземных температуры, температуры точки росы, скорости и направления ветра, а также количества выпавших за 12 часов осадков

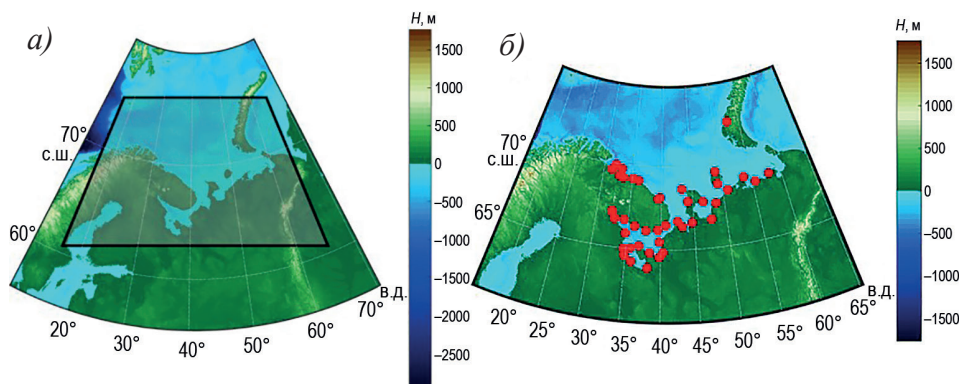


Рис. 1. Карты региона. Вычислительная область для моделей WRF, ROMS, CICE (а) и метеостанции, отображенные для оценок (б)

Fig. 1. Maps of the region. Computational domain for the WRF, ROMS, CICE models (а) and weather stations selected for evaluation (б)

по данным наблюдений на метеостанциях ISD (Integrated Surface Database) [34]. Данные наблюдений имеют 3-часовую дискретизацию, поэтому в случае атмосферы оценивали заблаговременности 27–120 ч с шагом 3 ч. Для оценок качества расчетов использовали только прибрежные и островные метеостанции с условием, чтобы они не были дальше 18 км (3 шага сетки атмосферной модели) от моря (рис. 1б).

Параметры состояния океана и морского льда оценивали по данным анализа GOFS 3.1 (Global Ocean Forecasting System 3.1) [23] с пространственным разрешением $0,04^\circ$ и с 40 уровнями по вертикали. Анализ доступен только за 12 часов по UTC каждого дня, поэтому в случае океана и морского льда оценивали заблаговременности 36, 60, 84 и 108 ч с последующим осреднением оценок по заблаговременности. Таким образом, статистика была получена по 700 928 парам прогноз-реанализа для каждого океанического параметра. В случае океана были получены оценки для всех рассчитываемых по ROMS океанических параметров на свободной ото льда поверхности — температуры поверхности моря, солёности на поверхности моря, скорости и направления течений на поверхности моря, а также динамического уровня моря. В случае морского льда оценивали толщину и сплоченность льда, а также скорость и направления дрейфа. Чтобы исключить при оценках пертурбации полей, вызванные граничными условиями, из анализа были исключены 50 узлов сетки (300 км) вблизи открытых границ (Север, Восток). Расчетная область выбиралась больше, чем нужно исходя из этих соображений.

Анализ результатов экспериментов

Анализ результатов расчета атмосферных параметров

В табл. 1 представлены систематическая (BIAS), абсолютная (MAE) и среднеквадратическая (RMSE) ошибки прогноза атмосферных параметров. Ошибки осреднены за весь период моделирования (для заблаговременностей 27, 30, ..., 120 ч) и по всей расчетной области. Статистический анализ для приземной температуры выполнен на основе 10648 пар прогноз–наблюдение; среднее число пар для каждого момента времени составило около 42 при общем количестве моментов порядка 257. Для приземной температуры точки росы для получения статистики использовали

Таблица 1

Ошибки расчета параметров атмосферной циркуляции

Table 1

Errors in calculating atmospheric circulation parameters

Параметр	BIAS	MAE	RMSE	SI
Приземная температура, °K	−2,11	2,82	3,50	0,01
Температура точки росы, °K	−1,30	2,36	3,04	0,01
Скорость приземного ветра, м/с	0,13	2,71	3,54	0,65
Направление приземного ветра, °	6,34	14,85	—	—
Количество выпавших за 12 ч осадков, мм	0,50	0,80	1,25	2,75

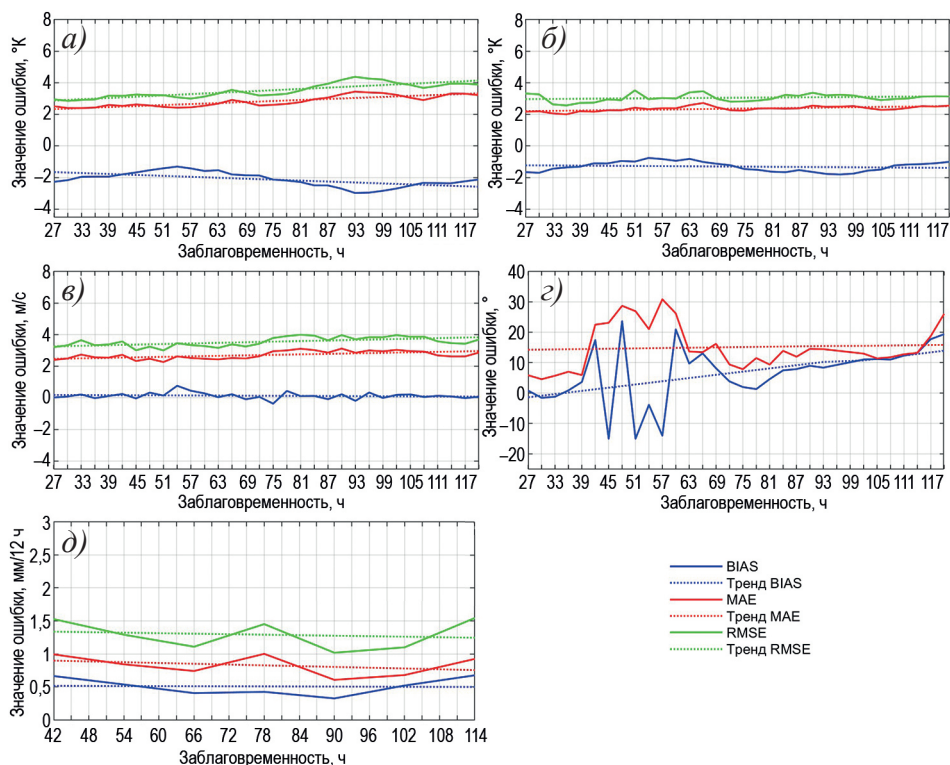


Рис. 2. Графики зависимости ошибок расчета от заблаговременности: приземная температура (а), приземная температура точки росы (б), скорость (в) и направление (г) приземного ветра, количество осадков (д)

Fig. 2. Graphs of the dependence of calculation errors on lead time: surface temperature (а), surface dew point temperature (б), surface wind speed (в), surface wind direction (г), precipitation (д)

10336 пары прогноз–наблюдение. Для скорости и направления приземного ветра — 10649. Для осадков — 1250. Интерполяция модельных данных в точки с координатами метеостанций проводилась методом усреднения с весами, обратно пропорциональными расстоянию до точки. Использовали 4 модельных узла, окружающих точку с координатами метеостанции.

Прогноз температуры и скорости ветра для арктического региона имеет несколько бóльшие ошибки, чем для умеренных широт, что обусловлено сложностью происходящих в Арктике метеорологических процессов, включая сильное влияние арктических морей на атмосферные процессы в данном регионе и редкость измерительной сети. Наблюдали систематическую недооценку рассчитанной приземной температуры и температуры точки росы на 2,11 °C и 1,30 °C соответственно и переоценку количества выпавших осадков на 0,50 мм.

На рис. 2 представлены графики зависимости ошибок расчета от заблаговременности для приземной температуры (2а), приземной температуры точки росы (2б), скорости (2в) и направления (2г) приземного ветра и количества осадков (2д). На графиках также приведены линейные тренды.

Анализируя рис. 2, можно сделать вывод о том, что для всех метеопараметров за исключением осадков наблюдаются положительные тренды роста ошибок с увеличением заблаговременности.

Анализ результатов расчета параметров состояния морского льда и океанических параметров

В табл. 2 представлены ошибки расчета толщины сплоченности и общего объема льда при использовании двух схем термодинамики льда BL99 и Mushy. Ошибки осреднены за весь период моделирования и по всей расчетной области. Общий объем льда считался по формуле (1):

$$V = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (H_{ij} \cdot A_{ij} \cdot S_{ij}), \quad (1)$$

где H — поле толщины льда, м; A — поле сплоченности льда (0–1); S — площадь каждой ячейки, м².

На рис. 3а представлены графики временного хода общего объема льда, рассчитанного для двух схем параметризаций и анализа GOFS 3.1, а также зависимости общего объема льда от заблаговременности (рис. 3б).

Из табл. 2 видно, что более простая схема BL99 оказывается более реалистичной, чем Mushy. Особенно при расчете сплоченности льда, когда наблюдается относительно большое завышение рассчитанной сплоченности льда при моделировании с использованием схемы Mushy. В случае толщины морского льда расчет с использованием схемы Mushy приводит к систематическому завышению толщины льда на 1 см, а расчет с использованием схемы BL99, наоборот, к занижению на 1 см. Бóльшая эффективность схемы BL99 подтверждается также при рассмотрении такого интегрального показателя качества расчета, как общий объем льда. Обе

Таблица 2

Ошибки расчета толщины, сплоченности и общего объема льда

Table 2

Errors in calculating ice thickness, concentration, and total volume

Параметр	Термодинамика льда	BIAS	MAE	RMSE
Толщина льда, м	BL99	–0,01	0,08	0,13
	Mushy	0,01	0,08	0,14
Сплоченность льда, %	BL99	2	12	20
	Mushy	10	14	25
Общий объем льда, км ³	BL99	1,50	1,63	2,11
	Mushy	4,67	4,67	4,96

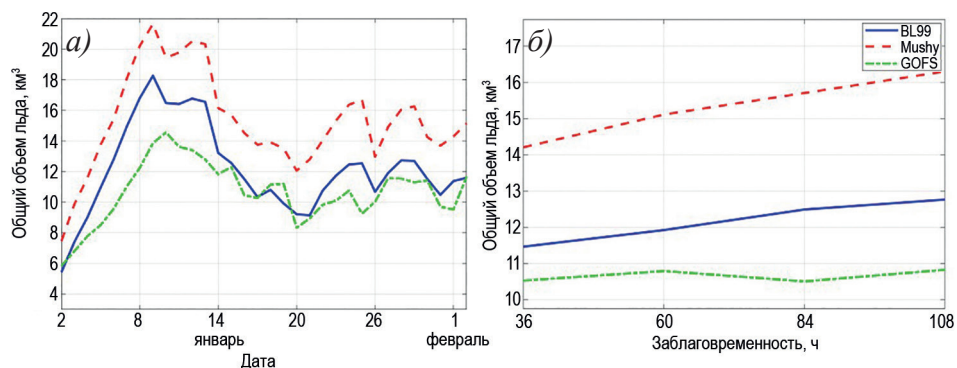


Рис. 3. Графики для общего объема льда: временной ход на 12 часов указанной даты (а), зависимость от заблаговременности (б)

Fig. 3. Graphs for total ice volume: time course at 12 o'clock on specific dates (a), dependence on lead time (b)

схемы склонны к завышению общего объема льда относительно данных анализа, но в случае использования схемы BL99 все ошибки существенно меньше (в 2–3 раза). На графиках, представленных на рис. 3а, хорошо видно, что на протяжении всего периода моделирования общий объем льда, посчитанный с использованием схемы Mushy, был больше рассчитанного с использованием схемы BL99. Объем льда в случае использования схемы BL99 лучше соотносится с данными анализа, особенно после 14.01.2023. На графике, представленном на рис. 3б, видно, что в случае использования схемы Mushy лед намерзает быстрее с ростом заблаговременности, чем для случая использования схемы BL99, и при расчете с заблаговременностью более 120 ч наблюдается тенденция к еще более быстрому росту расхождения рассчитанного с использованием схемы Mushy общего объема льда с данными анализа, чем для случая использования схемы BL99.

Бóльшие ошибки при расчетах с использованием более сложной схемы термодинамики Mushy, чем при использовании более простой BL99, можно объяснить тем, что схема Mushy, как физически более сложная, требует большей точности входных океанических параметров. Например, схема Mushy использует формулу теплообмена с учетом турбулентного теплопереноса и более чувствительна к ошибкам в скорости течений подо льдом, ошибкам в температуре и солености, параметризации турбулентности в ROMS, горизонтального и вертикального разрешения.

Так как при данной конфигурации моделей схема BL99 показала несколько лучшие результаты, дальнейший анализ рассчитанных полей состояния льда и океана проводился для варианта с использованием схемы BL99 в модели CICE.

В табл. 3 представлены ошибки расчета остальных параметров состояния льда и океанических параметров. Ошибки осреднены за весь период моделирования и по всей расчетной области.

По результатам верификации океанических параметров можно сделать вывод о том, что рассчитанная температура поверхности моря ниже температуры из анализа, что связано с занижением рассчитанной при помощи PWRP приземной температуры, которая является входным параметром. Наблюдалось незначительное завышение скорости течений и скорости дрейфа льда. В случае динамического уровня, наоборот, занижение.

Таблица 3

Ошибки расчета океанических параметров и параметров состояния морского льда

Table 3

Errors in the calculation of oceanic parameters and sea ice condition parameters

Параметр	BIAS	MAE	RMSE
Температура, °K	−0,09	0,16	0,27
Соленость, ‰	0,00	0,03	0,10
Скорость течений, м/с	0,03	0,07	0,13
Скорость дрейфа льда, м/с	0,09	0,14	0,26
Направление течений, °	−5	37	62
Направление дрейфа льда, °	−16	42	70
Уровень, м	−0,09	0,12	0,15
Толщина льда (BL99), м	−0,01	0,08	0,13
Сплоченность льда (BL99), %	2	12	20

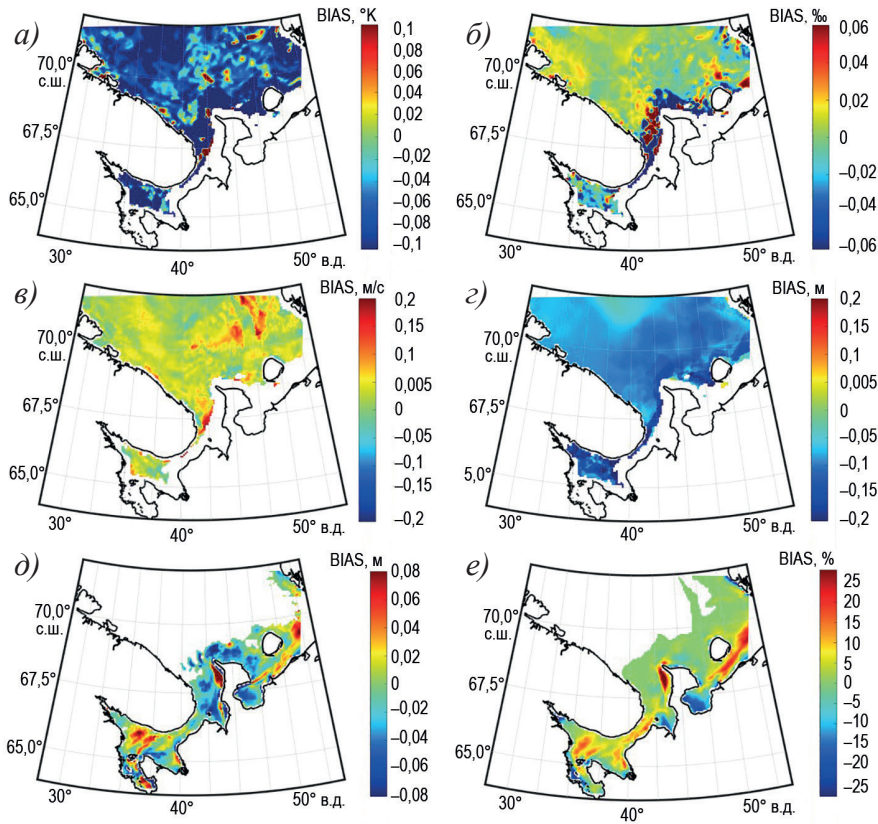


Рис. 4. Пространственное распределение систематических ошибок расчета: температура поверхности моря (а), соленость на поверхности моря (б), скорость течений на поверхности моря (в), динамический уровень (г), толщина морского льда (д) и сплоченность морского льда (е)

Fig. 4. Spatial distribution of BIAS in the calculation: sea surface temperature (a), sea surface salinity (b), sea surface current velocity (c), driving level (d), sea ice cover (e), and sea ice concentration (f)

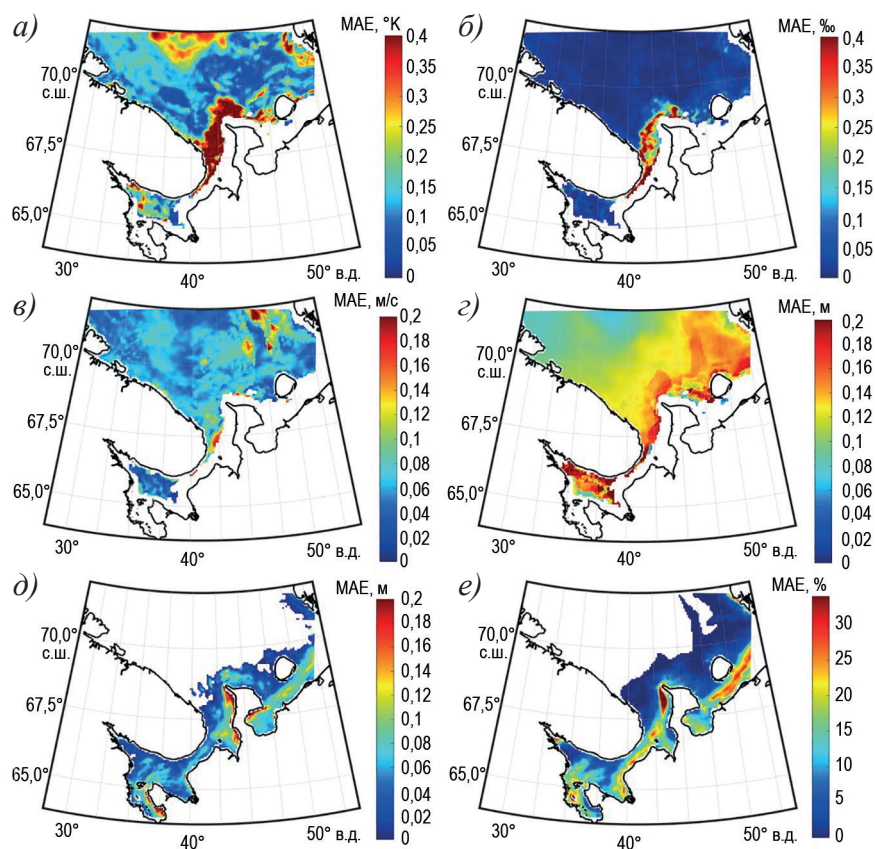


Рис. 5. Пространственное распределение абсолютных ошибок расчета: температура поверхности моря (а), соленость на поверхности моря (б), скорость течений на поверхности моря (в), динамический уровень (г), толщина морского льда (д) и сплоченность морского льда (е)

Fig. 5. Spatial distribution of MAE in the calculation: sea surface temperature (а), sea surface salinity (б), sea surface current velocity (в), driving level (г), sea ice cover (д), and sea ice concentration (е)

На рис. 4 представлены осредненные за весь период моделирования пространственные распределения систематических ошибок расчета температуры поверхности моря, солености на поверхности моря, скорости течений на поверхности моря, динамического уровня, толщины морского льда и его сплоченности. На рис. 5 представлены осредненные за весь период моделирования пространственные распределения абсолютных ошибок.

На представленных рисунках хорошо видно, что наибольшие ошибки расчета температуры, солености и скорости течений на поверхности моря наблюдались в Горле вблизи кромки льда, так как ледяная динамика в этом районе расчетной области может приводить к смещению фронтов, термоклинов и нарушению распределения массы воды. К тому же касательное напряжение трения атмосферного ветра на открытую воду гораздо сильнее, чем на лед, этим могут быть объяснены сравнительно большие ошибки (с завышением) в скорости поверхностных течений вблизи кромки льда в Горле (рис. 4), если кромка льда воспроизводится моделью

недостаточно точно. Что касается расчета толщины и сплоченности морского льда, то наибольшие ошибки наблюдались у п-ова Канин с систематическим завышением этих параметров относительно данных анализа.

Сравнение полученных результатов с другими исследованиями

Сравнение ошибок наших экспериментов по моделированию атмосферных характеристик (приземной температуры воздуха, приземной температуры точки росы, скорости приземного ветра) с результатами, приведенными в [11], показало следующее.

В наших расчетах приземной температуры воздуха систематическая ошибка составила $-2,11^{\circ}\text{C}$ при $\text{RMSE} = 3,50^{\circ}\text{C}$, тогда как в работе зарубежных коллег систематическая ошибка варьировала от $-0,72^{\circ}\text{C}$ (с Noah LSM) до $-0,98^{\circ}\text{C}$ (с Noah MP), а RMSE находилась в пределах $3,5\text{--}4,0^{\circ}\text{C}$. Таким образом, у нас отмечается более выраженное отрицательное смещение, однако среднеквадратичная ошибка оказалась практически идентичной результатам для Антарктики, что может указывать на схожие проблемы конфигурации моделей в передаче теплообмена в приповерхностном слое в условиях сложных ледово-морских покровов, но с региональными особенностями проявления холодного смещения.

По приземной температуре точки росы наша систематическая ошибка составила $-1,30^{\circ}\text{C}$ при $\text{RMSE} = 3,04^{\circ}\text{C}$. В исследовании [11] систематическая ошибка составила $-0,48^{\circ}\text{C}$ (Noah MP) и $-0,6^{\circ}\text{C}$ (Noah LSM), а RMSE достигал $3,5\text{--}4,0^{\circ}\text{C}$. Таким образом, в наших расчетах наблюдается более сильное отрицательное смещение по температуре точки росы, но при этом среднеквадратичная ошибка оказалась меньше, чем в Антарктике, что может быть связано с более высокой устойчивостью атмосферного пограничного слоя в Арктике, где условия испарения и влагосодержания воздуха сильнее ограничены низкими температурами.

Для скорости приземного ветра в наших расчетах значения ошибок составили: $\text{BIAS} = +0,13\text{ м/с}$ при $\text{RMSE} = 3,54\text{ м/с}$. В работе [11] BIAS изменялась от $\sim 0\text{ м/с}$ в летний период до $+1,0\text{ м/с}$ зимой, RMSE находилась в диапазоне $3,0\text{--}4,5\text{ м/с}$. Следовательно, наши результаты по ветру весьма близки к опубликованным значениям, причем BIAS ближе к нулю, чем для Антарктики.

Сравнение качества рассчитанных нами океанических параметров (температуры поверхности моря, солености, уровня моря) и параметров морского льда (толщины льда и скорости дрейфа льда) с результатами из других исследований показало следующие закономерности. В наших расчетах по температуре поверхности моря BIAS равен $-0,09^{\circ}\text{C}$ при RMSE , равном $0,27^{\circ}\text{C}$. Согласно межмодельному эксперименту OMIP-2 [2], RMSE по температуре поверхности моря у участников варьировала от $\sim 0,2$ до $1,0^{\circ}\text{C}$, при этом лучшие реализации с ассимиляцией демонстрировали $\text{RMSE} \sim 0,2\text{--}0,4^{\circ}\text{C}$. Таким образом, наши ошибки по температуре поверхности моря находятся в лучшей части диапазона опубликованных значений. Для поверхностной солености нами получены значения $\text{BIAS} = 0,00\text{ ‰}$ и $\text{RMSE} = 0,10\text{ ‰}$. В моделях OMIP-2 RMSE по солености обычно составляет $0,05\text{--}0,5\text{ ‰}$ в зависимости от региона. Наш результат соответствует нижней границе диапазона. Для уровня моря наши ошибки составили $\text{BIAS} = -0,09\text{ м}$ и $\text{RMSE} = 0,15\text{ м}$. В глобальных и региональных системах RMSE уровня колеблется в пределах $0,05\text{--}0,3\text{ м}$ [35, 36]. Таким образом, наши значения находятся в типичном диапазоне для региональных моделей без детальной ассимиляции уровня. Для толщины льда (BL99) нами получено $\text{BIAS} = -0,01\text{ м}$ и $\text{RMSE} = 0,13\text{ м}$. Сравнение модельных данных, представленных

в работе [37] и работе [3], со спутниковыми продуктами CryoSat-2 и ICESat-2 показывает RMSE толщины льда в диапазоне 0,08–0,3 м, в зависимости от региона и сезона. Таким образом, наши ошибки находятся на нижней границе опубликованных значений. Для скорости дрейфа льда нами получено $\text{BIAS} = 0,09$ м/с и $\text{RMSE} = 0,26$ м/с. В литературе для лучших схем с уточненной параметризацией ветрового трения ошибки RMSE варьируются от 0,05 до 0,07 м/с [9]. Таким образом, наши значения RMSE несколько выше лучших опубликованных результатов.

Заключение

По итогам работы была реализована система прогноза морского льда, состояния океана и атмосферы для Белого моря. Расчеты циркуляции атмосферы выполнялись с использованием модели WRF отдельно, а модели ROMS и CICE были объединены в единую систему для воспроизведения океанических параметров и динамики морского льда.

Полученные результаты показали, что система воспроизводит атмосферные и океанические параметры с качеством, сопоставимым с аналогичными зарубежными исследованиями. Атмосферные расчеты демонстрируют более выраженное холодное смещение приземной температуры воздуха и приземной температуры точки росы по сравнению с результатами над Антарктикой, однако значения RMSE находятся на уровне или ниже опубликованных оценок, а скорость ветра воспроизводится с меньшей систематической ошибкой, чем для Антарктики. Температура поверхности моря, соленость на поверхности моря, уровень моря и толщина льда воспроизводятся с малыми ошибками, находящимися на нижней границе диапазона опубликованных данных. Основным слабым местом системы является описание скорости дрейфа льда, а также описание температуры поверхности моря, поверхностной солености и уровня на границе лед — открытая вода. Важным результатом работы стало сравнение двух схем параметризации термодинамики льда. Более простая схема BL99 показала лучшие результаты и более стабильную работу по сравнению со схемой Mushy, требующей высокого разрешения и большего числа вертикальных уровней. Несмотря на систематическую переоценку общего объема льда, использование BL99 обеспечивает лучшее согласование с данными анализа GOFS 3.1.

Среди ограничений работы следует отметить относительно грубое горизонтальное разрешение расчетных сеток и отсутствие ассимиляции данных наблюдений. Эти факторы во многом объясняют выявленные ошибки, особенно в районах перехода лед — открытая вода, где динамичность границы приводит к существенным отклонениям в распределении океанических характеристик. В дальнейшем предполагаем это учесть. Перспективы дальнейшего развития связаны с увеличением пространственного разрешения моделей, внедрением более совершенных схем параметризаций, а также использованием ассимиляции спутниковых данных по морскому льду и океаническим полям. Это позволит, как мы надеемся, повысить точность прогноза дрейфа льда и океанических течений. Отметим и практическую значимость работы, которая заключается в том, что созданная система прогноза может быть использована для оперативного прогноза состояния Белого моря, поддержки судоходства и хозяйственной деятельности в регионе, а также для исследования климатических изменений в полярных широтах.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено без финансовой поддержки в рамках работы над диссертацией.

Competing interests. No conflict of interests.

Funding. This research received no external funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кузнецов М.В., Гецов А.А., Лукина С.М. Проблемные вопросы, связанные с необходимостью преодоления последствий радиационных загрязнений экосистемы арктической зоны Российской Федерации. *Инновационная наука*. 2023;3-1:51–52.
Kuznetsov M.V., Getsov A.A., Lukina S.M. Problematic issues related to overcoming the consequences of radioactive contamination in the ecosystem of the Arctic zone of the Russian Federation. *Innovatsionnaya Nauka = Innovation Science*. 2023;3-1:51–52. (In Russ.).
2. Tsujino H., Urakawa L.S., Griffies S.M., Danabasoglu G., Adcroft A.J., Amaral A.E., Arsouze T., Bentsen M., Bernardello R., Böning C.W., Bozec A., Chassignet E.P., Danilov S., Dussin R., Exarchou E., Fogli P.G., Fox-Kemper B., Guo C., Ilicak M., Iovino D., Kim W.M., Koldunov N., Lapin V., Li Y., Lin P., Lindsay K., Liu H., Long M.C., Komuro Y., Marsland S.J., Masina S., Nummelin A., Rieck J.K., Ruprich-Robert Y., Scheinert M., Sicardi V., Sidorenko D., Suzuki T., Tatebe H., Wang Q., Yeager S.G., Yu Z. Evaluation of global ocean–sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2). *Geoscientific Model Development*. 2020;13(8):3643–3708. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3643-2020>
3. Sievers I., Rasmussen T.A.S., Stenseng L. Assimilating CryoSat-2 freeboard to improve Arctic sea ice thickness estimates. *The Cryosphere*. 2023;17(9):3721–3738. <https://doi.org/10.5194/tc-17-3721-2023>
4. *Product User Guide & Algorithm Specification — AWI CryoSat-2 Sea Ice Thickness v2.4*. Alfred Wegener Institute (AWI); 2021. 58 p.
5. 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 (LA-CC-06-012)*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; 2015.
6. Madec G. and the NEMO System Team. *NEMO Ocean Engine Reference Manual. Version 5.0.0*. Zenodo; 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1464816>
7. *ICESat-2 Algorithm Theoretical Basis Document for Global Geolocated Photons (ATL03), Release 005*. Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center; 2021. 208 p.
8. *Operation IceBridge: An airborne mission for Earth's polar ice*. NASA Goddard Space Flight Center; 2009–2020. Available at: <https://icebridge.gsfc.nasa.gov/> (accessed 20.03.2025).
9. Schweiger A.J., Zhang J. Accuracy of short-term sea ice drift forecasts using a coupled ice-ocean model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015;120(12):7827–7841. <https://doi.org/10.1002/2015JC011273>
10. Schweiger A., Lindsay R., Zhang J., Steele M., Stern H. Uncertainty in modeled Arctic sea ice volume. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011;116:C07001. <https://doi.org/10.1029/2011JC007084>
11. Xue J., Xiao Z., Bromwich D.H., Bai L. Polar WRF V4.1.1 simulation and evaluation for the Antarctic and Southern Ocean. *Frontiers of Earth Science*. 2022;16:1005–1024. <https://doi.org/10.1007/s11707-022-0971-8>
12. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X.-Y. A description of the advanced research WRF model Version 4.1. 2019. Available at: <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97> (accessed 20.03.2025).
13. Дианский Н.А., Фомин В.В., Кабатченко И.М., Грузинов В.М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики. *Арктика: экология и экономика*. 2014;1:57–73.

- Diansky N.A., Fomin V.V., Kabatchenko I.M., Gruzinov V.M. Simulation of circulation of the Kara and Pechora seas through the system of express diagnosis and prognosis of marine dynamics. *Arctic: Ecology and Economy*. 2014;1:57–73. (In Russ.).
14. Дианский Н.А., Кабатченко И.М., Фомин В.В., Панасенкова И.И., Резников М.В. Система диагноза и прогноза термогидродинамических характеристик и ветрового волнения в западных морях российской Арктики и расчет параметров экстремального шторма 1975 г. в Баренцевом море с учетом ледовых условий. *Вести газовой науки*. 2018;4(36):156–165.
15. Платонов В.С., Мысленков С.А., Архипкин В.С., Кислов А.В. Высокоразрешающее моделирование гидрометеорологических полей в прибрежных районах Карского моря в условиях сложной конфигурации береговой линии. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2022;1:87–106.
Platonov V.S., Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S., Kislov A.V. High-resolution modeling of hydrometeorological fields over the Kara Sea coastal regions with irregular coastline. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Lomonosov Geography Journal* 2022;(1):87–106. (In Russ.).
16. The WAVEWATCH III Development Group. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 5.16. Technical Note 329. NOAA/NWS/NCEP/MMAB: College Park, MD, USA; 2016. 326 p. Available at: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf> (accessed 20.03.2025).
17. ADCIRC. Advanced CIRCulation Model. The University of North Carolina at Chapel Hill; 2025. Available at: <https://adcirc.org/> (accessed 20.03.2025).
18. Myslenkov S., Shestakova A., Chechin D. The impact of sea waves on turbulent heat fluxes in the Barents Sea according to numerical modeling. *Atmos. Chem. Phys.* 2021;21:5575–5595. <https://doi.org/10.5194/acp-21-5575-2021>
19. 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;9(4):347–404. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>
20. Kumar R., Li J., Hedstrom K., Babanin A.V., Tang Y. Intercomparison of Arctic sea ice simulation in ROMS-CICE and ROMS-Budgell. *Polar Sci.* 2021;29:100716. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100716>
21. Yang C.-Y., Liu J., Chen D. An improved regional coupled modeling system for Arctic sea ice simulation and prediction: a case study for 2018. *Geosci. Model Dev.* 2022;15:1155–1176. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1155-2022>
22. Wang W., Chen M., Kumar A. An assessment of the CFS real-time forecast. *Weather Forecast.* 2010;25:950–969. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222345.1>
23. Metzger E.J., Helber R.W., Hogan P.J., Posey P.G., Thoppil P.G., Townsend T.L., Wallcraft A.J., Smedstad O.M., Franklin D.S., Zamudo L., Phelps M. W. *Global ocean forecast system 3.1 Validation test. Report No. AD1034517*. Stennis Space Center, MS: Naval Research Laboratory; 2017. 112 p. Available at: https://archive.org/details/DTIC_AD1034517 (accessed 20.03.2025).
24. Morrison H., Thompson G., Tatarskii V. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: comparison of one- and two-moment schemes. *Mon. Wea. Rev.* 2009;137:991–1007. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>
25. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.* 2008;113:D13103. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
26. Nakanishi M., Niino H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*. 2009;87(5):895–912. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87.895>

27. Olson J.B., Kenyon J.S., Angevine W.M., Brown J.M., Pagowski M., Sušelj K. A description of the MYNN-EDMF scheme and the coupling to other components in WRF–ARW. *NOAA Technical Memorandum OAR GSD*. 2019;61:37. <https://doi.org/10.25923/n9wm-be49>
28. Niu G.-Y., Yang Z.-L., Mitchell K.E., Chen F., Ek M.B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah–MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.* 2011;116:D12109. <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
29. Kain J.S. The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2004;43:170–181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
30. Warner J.C., Sherwood C.R., Arango H.G., Signell R.P. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. *Ocean Modelling*. 2005;8:81–113.
31. Bitz C.M., Lipscomb W.H. An energy-conserving thermodynamic model of sea ice. *J. Geophys. Res. Oceans*. 1999;104(C7):15669–15677. <https://doi.org/10.1029/1999JC900100>
32. Turner A.K., Hunke E.C., Bitz C.M. Two modes of sea-ice gravity drainage: a parameterization for large-scale modeling. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013;118:2279–2294. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20171>
33. Jensen T., Prestopnik J., Soh H., Goodrich L., Brown B., Bullock R., Halley Gotway J., Newman K., Opatz J. The MET Version 12.0.2 User’s Guide. Developmental Testbed Center; 2025. Available at: <https://github.com/dtcenter/MET/releases> (accessed 12.03.2025).
34. Smith A., Lott N., Vose R. The integrated surface database: recent developments and partnerships. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2011;92(6):704–708. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3015.1>
35. Treu S., Muis S., Dangendorf S., Wahl T., Oelsmann J., Heinicke S., Frieler K., Mengel M. Reconstruction of hourly coastal water levels and counterfactuals without sea level rise for impact attribution. *Earth System Science Data*. 2024;16(2):1121–1136. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1121-2024>
36. Muis S., Irazoqui Apecechea M., Dullaart J., de Lima Rego J., Madsen K.S., Su J., Yan K., Verlaan M. A high-resolution global dataset of extreme sea levels, tides, and storm surges, including future projections. *Frontiers in Marine Science*. 2020;7:263. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00263>
37. Liu Y., Key J. R., Wang X., Tschudi M. Multidecadal Arctic sea ice thickness and volume derived from ice age. *The Cryosphere*. 2020;14(4):1325–1345. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1325-2020>