

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ОКЕАНА И МОРСКОГО ЛЬДА ДЛЯ АРКТИКИ

Н. Ю. Бутаков, К. Г. Рубинштейн, Р. Ю. Игнатов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2024 г.

Для цитирования

Бутаков Н. Ю., Рубинштейн К. Г., Игнатов Р. Ю. Расчет параметров состояния океана и морского льда для Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 2. — С. ?—?. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-?-?.

В рамках исследования была реализована совместная система прогноза параметров состояния океана и морского льда для района пролегания Северного морского пути (СМП). Для расчета океанических параметров использовалась модель ROMS, параметры состояния морского льда считались при помощи модели CICE. Были получены первые результаты расчета и проведена оценка их качества. Результаты в целом удовлетворительно согласуются с эмпирическими данными, но наблюдались ошибки прогноза температуры поверхности моря на западе области. Расчеты по модели ROMS-CICE могут помочь судоходным компаниям и операторам СМП оптимизировать маршруты и снизить риски, связанные с морским льдом, помочь в развитии арктической логистики и инфраструктуры, а также обеспечить безопасность нефтегазовых объектов. Экологические организации могут использовать эти данные для мониторинга ледового покрова и его влияния на экосистемы.

Ключевые слова: морской лед, океан, Северный морской путь, Арктика, численное моделирование.

Введение

Происходящие климатические изменения в Арктике имеют как отрицательные, так и положительные последствия. К последним можно отнести улучшение ледовой обстановки для развития Северного морского пути. В [1] показано, что изменение климата и режима мерзлотности в прибрежных районах Арктики способствует развитию традиционных промыслов коренных народов Севера, в частности добычи мамонтовой кости в результате таяния вечной мерзлоты и оленеводства за счет увеличения биологической продуктивности пастбищ.

С отступлением морских льдов Арктика становится более доступной для судоходства — все боль-

шее значение приобретает Северный морской путь (СМП). Поэтому большое значение имеют надежные прогнозы ледовой обстановки и океанических параметров, которые могут помочь предотвратить аварии, снизить транспортные расходы и обеспечить безопасность маршрутов. Прогнозы параметров состояния морского льда и океана также могут быть полезны при решении радиационно-экологических проблем Арктической зоны, поскольку в настоящее время на дне морей северо-западной Арктики находятся около 18 тыс. затопленных объектов различной степени радиационной опасности [2]. В дополнение ко всему за Северным полярным кругом действуют Кольская и Билибинская АЭС, а также плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов». Все изложенное подтверждает

Проблемы Северного морского пути

важность реализации системы прогноза состояния океана и морского льда для арктического региона в целом и для СМП в частности.

Целью работы была реализация системы прогноза состояния океана и морского льда для области СМП, а также верификация первых предварительных результатов расчетов. Предварительными результатами расчета называем, поскольку в дальнейшем планируется улучшить качество расчета путем подбора оптимальных конфигураций моделей и совмещения моделей ROMS и CICE с моделью WRF в совместную систему WRF-ROMS-CICE.

Моделированию морского льда посвящено много работ, среди которых стоит выделить [3], в которой проведен сравнительный анализ двух моделей морского льда CICE и Budgell с целью оценки их точности в моделировании морского льда в Арктике. Как в случае модели CICE, так и в случае модели Budgell в качестве океанического компонента совместной системы использовалась модель ROMS. Сравнивались сплоченность морского льда и его толщина, при этом в качестве критериев оценки качества использовались коэффициенты корреляции и центрированные среднеквадратичные ошибки (CRMSE). Был выбран период моделирования с 1 января по 31 декабря 2018 г. Регион моделирования — весь Северный Ледовитый океан с прилегающими к нему морями. Шаг сетки моделей — от 4,7 до 9,0 км. В океанической модели использовались 50 вертикальных уровней. Инициализация моделей была выполнена с использованием данных о сплоченности морского льда NSIDC¹ и толщине льда CS2SMOS². Верификация результатов моделирования проводилась также по данным NSIDC и CS2SMOS. В качестве атмосферного форсинга использовались данные реанализа ERA5³.

Что касается верификации сплоченности льда, модель CICE показала более высокие коэффициенты корреляции (свыше 0,9) в большинстве субрегионов за исключением центральной Арктики, Канадского архипелага и моря Бофорта. Для модели Budgell коэффициенты корреляции были ниже во всех субрегионах. Модель CICE показала наилучшие результаты в Восточно-Сибирском море (корреляция 0,99 и CRMSE 0,25). По результатам данного сравнения модель CICE продемонстрировала более высокую точность в моделировании сплоченности морского льда в большинстве субрегионов.

Помимо упомянутой выше работы также стоит выделить исследование российских авторов [4], в которой приведены результаты численного эксперимента, направленного на моделирование харак-

теристик Северного Ледовитого океана с помощью совместной системы INMIO-CICE.

Для моделирования была выбрана область, включающая Северный Ледовитый океан и Северную Атлантику. Модельная область охватывала территорию к северу от 42° с. ш., применялась горизонтальная сетка с разрешением 0,25°. В модели океана использовались 49 уровней с шагом от 6 м в верхнем 250-метровом слое. Период моделирования составлял пять лет с 1948 по 1953 гг. Начальные условия по температуре и солёности в исследовании были взяты из набора данных WOA09 (World Ocean Atlas 2009)⁴. Это годовые средние значения температур и солёности для моделирования океана. В модели также были установлены равными нулю начальные скорости океанических течений и распределение морского льда с толщиной 2 м, равномерно заполняющее океан к северу от 70° с. ш. В качестве атмосферного форсинга использовались данные реанализа NCEP/NCAR⁵. Модельные результаты сравнивались с данными реанализа ERA-20C⁶ и WOA09.

По результатам верификации модельных расчетов авторы пришли к выводу, что по сплоченности льда модель показала хорошее соответствие с данными реанализа в марте за исключением северной части Тихого океана, где наблюдалось небольшое завышение модельной сплоченности льда. В сентябре модель переоценивала площадь ледяного покрова в Арктике и Северной Атлантике, что связано с недостаточным переносом тепла на север и высокими значениями вязкости в модели океана. Внутри Северного Ледовитого океана отклонения температур были незначительными, но довольно большими возле кромки льда.

Мартовское распределение температур сильно влияло на вертикальные процессы перемешивания. В марте средние отклонения модельной температуры поверхности моря от данных реанализа ERA-20C варьировались в пределах +1—2°C в Лабрадорском море и Северной Атлантике. В сентябре средние отклонения модельной температуры поверхности моря от данных реанализа ERA-20C составляли около +1°C в Чукотском море. Глубина верхнего перемешанного слоя в модели достигала 2875 м в северной части Лабрадорского моря, в то время как по данным WOA09 она составляла всего 100 м, что связано с неверной стратификацией воды в модели. Модель недооценила северный перенос воды, максимальная функция течения составила 15,4 Sv по сравнению с 18,6 Sv в данных RAPID⁷.

¹ National Snow and Ice Data Center (NSIDC). Available at: <https://nsidc.org/home>.

² CryoSat-2 and SMOS Data Portal. Alfred Wegener Institute. Available at: <https://spaces.awi.de/display/CS2SMOS>.

³ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Available at: <https://www.ecmwf.int/>.

⁴ National Centers for Environmental Information (NCEI). Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/>.

⁵ NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL). Available at: <https://psl.noaa.gov/>.

⁶ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Available at: <https://www.ecmwf.int/>.

⁷ Rapid Access Computing (Rapid). Available at: <https://rapid.ac.uk/>.

Резюмируя результаты исследования, авторы пришли к выводу, что в целом система INMIO-CICE может качественно воспроизводить термогидродинамическую изменчивость Северного Ледовитого океана на рассматриваемых временных и пространственных масштабах.

Исследование [5] нацелено на анализ качества моделирования толщины морского льда в Арктике в рамках проекта Arctic Ocean Model Intercomparison Project (AOMIP). Целью работы было выявить ключевые характеристики моделей для дальнейшего улучшения. В исследовании использовались шесть моделей:

1. ECCO2 (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean, Phase II) — модель, разработанная для изучения глобального океанического и ледяного покрова.

2. UW (University of Washington) — модель ледяного покрова, разработанная исследователями из Университета Вашингтона.

3. MITgcm (Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model) — модель общего круговорота океана и атмосферы, активно используемая для исследования морского льда.

4. NAOSIM (North Atlantic/Arctic Ocean Sea Ice Model) — модель, ориентированная на исследование морского льда в Северной Атлантике и Арктике.

5. POSEIDON — модель, разработанная для изучения процессов в арктическом океане.

6. INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) — модель, созданная Институтом вычислительной математики РАН и ориентированная на моделирование процессов в арктическом бассейне.

Результаты моделей сравнивались с данными наблюдений, собранными несколькими методами: спутниковыми измерениями (ICESat)⁸, подводными датчиками (ULS), воздушными электромагнитными измерениями и буровыми скважинами.

Период моделирования охватывал интервал с 1975 до 2008 гг. Сравнение моделей с данными велось по таким критериям, как средняя толщина льда, пространственное распределение толщины, а также соответствие данным наблюдений по конкретным географическим районам.

Анализ результатов показал, что все модели, как правило, склонны недооценивать толщину льда, если она превышает 2 м, и переоценивать ее, если она меньше 2 м. Эти модели показали относительно слабое соответствие данным по так называемому быстрому льду и ледяным покровам на мелководных морях вдоль сибирского шельфа. В целом результаты моделей ECCO2 и UW продемонстрировали наименьшие расхождения с наблюдениями и показали наибольшую корреляцию, что делает их предпочти-

тельными для дальнейших работ по улучшению прогностических возможностей моделей AOMIP.

В [6] проведен анализ точности девяти моделей, участвующих в проекте AOMIP, по концентрации морского льда в Арктике в период с 1979 по 2001 гг. Целью работы была оценка различий между моделями и выявление недостатков для последующего их устранения. В исследовании использовались модели GSFC, LANL, NPS, UW и др.

В экспериментах использовалась сетка с полярной стереографической проекцией с разрешением 12,5 км. Сравнивались средние значения и медианы концентрации льда для многолетних данных и данных за сентябрь (минимальная площадь льда). Сравнение проводилось как между моделями, так и с данными наблюдений. По его итогам большинство моделей занижают концентрацию льда в сентябре в центральной части Арктики по сравнению с наблюдениями, что может влиять на прогнозы климатических изменений в регионе.

Сезонные и межгодовые колебания льда также были изучены: зимние значения концентрации льда моделей демонстрировали большее сходство, так как большинство моделей показывали почти 100%-ный ледяной покров. Летние значения были более разнообразными. Примечательно, что модели NPS, LANL, AWI1, UW, IOS и AWI2 правильно воспроизвели снижение концентрации льда в 1990 г., тогда как модели GSFC, ICM и RAS не показали значительного изменения в этот период. Эти различия были связаны с разницей в атмосферном и океаническом форсингах и различием в параметризациях моделей. Авторы отмечают, что все модели демонстрируют более высокую изменчивость, чем данные наблюдений, что свидетельствует о необходимости дополнительных исследований для оптимизации параметров и физического моделирования.

Методы и материалы

Для расчета полей океана и морского льда использовалась совместная система ROMS-CICE. Ниже дано краткое описание входящих в нее моделей.

ROMS (Regional Ocean Modeling System) — это совершенствуемая численная модель, разработанная для моделирования динамики океанов и прибрежных морей. ROMS разработана в Калифорнийском и Ратгерском университетах и находится в свободном доступе. Одними из главных преимуществ ROMS по сравнению с другими океаническими моделями являются высокая разрешающая способность и адаптивность к региональным условиям, что делает ее подходящей для моделирования мелкомасштабных и мезомасштабных процессов, таких как турбулентность, течения и температурные градиенты, особенно в прибрежных арктических зонах. Эта модель использует современные численные схемы, которые обеспечивают высокую точность в расчетах и позволяют описывать сложные процессы, например апвеллинг, смешивание и взаимодействие

⁸ ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite). NASA. Available at: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/>.

Проблемы Северного морского пути

воды с морским дном. ROMS также поддерживает разнообразные схемы параметризации, что позволяет исследователям детализировать процессы в зависимости от условий конкретного региона [7].

CICE (Community Ice CodE) — инструмент для моделирования и прогнозирования динамики морского льда. Благодаря своей точности, гибкости и поддержке со стороны научного сообщества модель широко используется в климатологических исследованиях и оперативных прогностических системах, способствуя более глубокому пониманию процессов, связанных с морским льдом, и улучшению прогнозов. CICE позволяет моделировать взаимодействие морского льда с атмосферой и океаном, что позволяет учесть влияние ветра, течений и температурных изменений на лед [8].

Так как авторы [3] показали, что модель CICE обеспечивает в целом лучшее качество расчета морского льда, нежели модель Budgell, мы остановились на использовании CICE в данной работе.

В качестве атмосферного форсинга в моделях ROMS и CICE использовались посчитанные при помощи WRF компоненты скорости ветра, приземное давление, относительная влажность, температура воздуха на 2 м, осадки, а также приходящая длинноволновая и коротковолновая радиация.

Модель WRF запускалась на сетке с разрешением 18 км. Расчет велся с заблаговременностью 27 ч. В качестве параметризации микрофизики при расчетах использовалась схема Томпсона [9], в качестве параметризации длинноволновой и коротковолновой радиации использовалась схема RRTMG [10], в качестве параметризации пограничного и приземного слоя использовалась схема MYNN [11], в качестве параметризации поверхностного слоя земли использовалась схема Noah-MP [12], в качестве параметризации конвекции использовалась схема Каина — Фрича [13].

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

В ходе работы был произведен запуск совместной системы ROMS-CICE для периода с 1 января по 1 февраля 2023 г. Расчетная сетка моделей ROMS и CICE покрывала собой Баренцево, Карское, Восточно-Сибирское моря и Море Лаптевых с шагом 0,2°. Оценивалось качество расчета температуры поверхности моря, уровня моря, сплоченности и толщины морского льда, а также скорости и направления дрейфа льда. В качестве эталона при оценке качества прогноза температуры поверхности моря и сплоченности льда использовался реанализ OISST 9, а при оценке качества прогноза остальных параметров состояния океана и морско-

го льда в качестве эталона использовался реанализ GLORYS12V1 10. В табл. 1 представлена конфигурация моделей.

Результаты исследования

Анализ результатов расчета температуры поверхности и уровня моря

Ошибки в прогнозе температуры поверхности моря и уровня моря могут возникать из-за множества факторов, включая:

1. Неточности в исходных данных:

- ограниченное количество измерений (особенно в удаленных районах океана);
- ошибки спутниковых данных из-за облачности, атмосферных возмущений или недостаточной разрешающей способности;
- погрешности датчиков на буях и кораблях.

2. Ограниченность моделей:

- упрощенные физические процессы (например, не всегда корректно учитывается влияние мелкомасштабных течений и вихрей);
- грубая пространственная и временная дискретизация сетки модели;
- ошибки в параметризации процессов подсеточного масштаба.

3. Влияние неожиданных природных факторов:

- экстремальные погодные явления (ураганы, аномальные штормы);
- подводные землетрясения и извержения вулканов, которые могут вызвать цунами и аномальные колебания уровня моря;
- долгосрочные климатические изменения (например, Эль-Ниньо и Ла-Нинья), которые модели могут прогнозировать с опозданием.

4. Человеческий фактор:

- ошибки в алгоритмах обработки данных;
- недостатки в интеграции различных источников данных;
- ограниченность вычислительных мощностей, приводящая к необходимости упрощения расчетов.

Предлагаемые в статье подходы к расчету температуры поверхности моря и уровня моря с применением самых современных моделей океана и льда и с использованием начальных и граничных условий, полученных из различных источников, позволяют уменьшить многие из перечисленных ошибок.

В табл. 2 представлены ошибки прогноза океанических параметров. Они осреднены за весь период моделирования и по всей расчетной области.

По результатам верификации океанических параметров можно сделать вывод о том, что абсолютная ошибка прогноза температуры поверхности моря меньше 0,5°C. При этом рассчитанная температура поверхности моря ниже температуры из реанализа

⁹ NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL). Available at: <https://psl.noaa.gov/>.

¹⁰ GLORYS12V1 Global Ocean Reanalysis. Copernicus Marine Service (Mercator Ocean International). Available at: <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-reanalysis>.

Таблица 1. Конфигурация моделей ROMS и CICE
Table 1. Configuration of ROMS and CICE models

Период моделирования	01.01.2023—01.02.2023	
Заблаговременность	744 ч	
Шаг по времени	15 с	
Расчетная сетка	791 × 86	
Шаг сетки	0,2 × 0,2°	
Начальные и граничные условия	Прогноз глобальной модели HYCOM-CICE *	
Приливы	Рассчитывались по данным атласа TPXO **	
Батиметрия	GEBCO ***	
Вертикальное турбулентное перемешивание	GLS [14]	
Граничные условия на открытых границах (Север, Запад, Восток) для океана	Уровень	Chapman bc [15]
	Компоненты скорости течений	Radiation bc [16]
	Температура	Radiation bc
	Соленость	Radiation bc
	Турбулентная кинетическая энергия	Gradient bc
Термодинамика льда	Bitz and Lipscomb model [17]	
Температура замерзания воды	Линейная функция солености	
Граничные условия на открытых границах (Север, Запад, Восток) для льда	Концентрация льда	Mixed radiation-nudging bc [18]
	Толщина льда	Mixed radiation-nudging bc
	Толщина снега	Mixed radiation-nudging bc
	Компоненты дрейфа льда	Radiation bc

* HYCOM Consortium. Available at: <https://www.hycom.org/>.

** General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). Available at: <https://www.gebco.net/>.

*** TPXO Global Tide Models. Available at: <https://www.tpxo.net/>.

Примечание. Данные авторов.

Note. The authors' data.

Таблица 2. Ошибки прогноза океанических параметров
Table 2. Errors in oceanic parameter forecasting

Ошибка	Температура поверхности моря, °C		Уровень, м	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-0,42	-0,44	0,36	0,44
MAE	0,44	0,45	0,42	0,45

Примечание. Данные авторов.

Note. The authors' data.

(сеточные данные, получаемые с помощью различных источников, таких как спутники, буи, наблюдения с судов и т. д.). Касательно рассчитанного уровня моря стоит отметить, что наблюдалось его систематическое завышение на 36 см.

На рис. 1 представлено осредненное за весь период моделирования 01.01.2023—01.02.2023 пространственное распределение систематической и абсолютной ошибок прогноза температуры поверхности моря.

Проблемы Северного морского пути

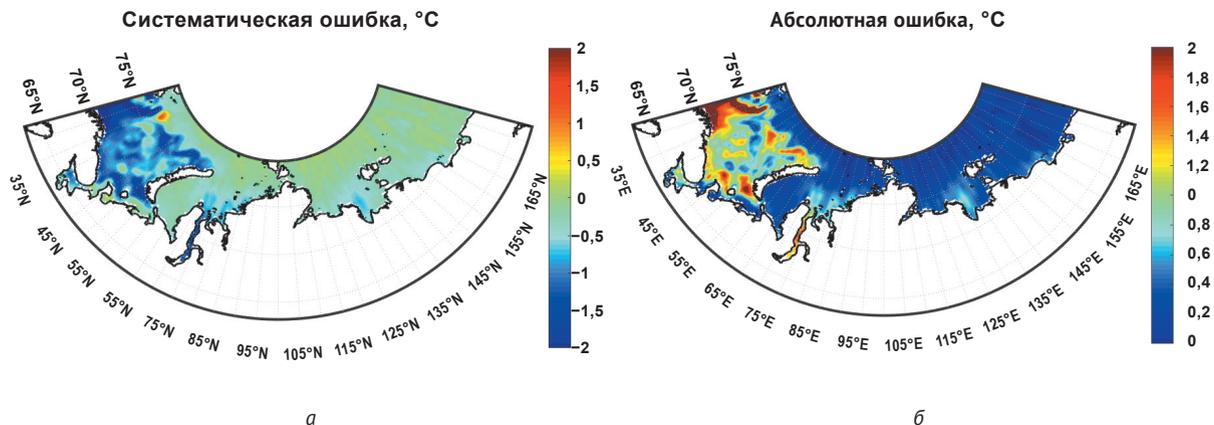


Рис. 1. Пространственное распределение ошибок прогноза температуры поверхности моря, осредненных за период 01.01.2023–01.02.2023: систематическая ошибка (а), абсолютная ошибка (б). Данные авторов
 Fig. 1. Spatial distribution of sea surface temperature forecast errors: averaged over the period 01.01.2023–01.02.2023: systematic error (BIAS) (a), absolute error (MAE) (b). The authors' data

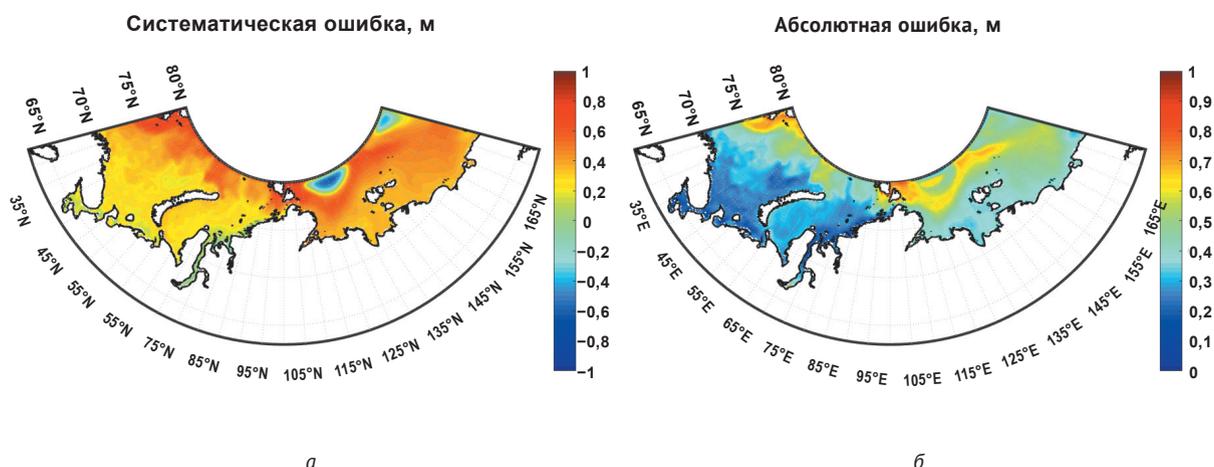


Рис. 2. Пространственное распределение ошибок прогноза уровня моря, осредненных за период 01.01.2023–01.02.2023: систематическая ошибка (а), абсолютная ошибка (б). Данные авторов
 Fig. 2. Spatial distribution of sea level forecast errors: averaged over the period 01.01.2023–01.02.2023: systematic error (BIAS) (a), absolute error (MAE) (b). The authors' data

На представленных рисунках хорошо видно, что наибольшие ошибки прогноза температуры поверхности моря наблюдались в западной части расчетной области (особенно на западной границе), где рассчитанная температура поверхности моря ниже температуры по данным реанализа OISST на 2°C. В шельфовых зонах вдоль побережья России наблюдались умеренные значения абсолютной ошибки, что указывает на сложности моделирования в этих зонах. Для остальных же частей расчетной области ошибки прогноза температуры поверхности моря близки к нулю.

На рис. 2 представлено осредненное за весь период моделирования 01.01.2023–01.02.2023 пространственное распределение систематической и абсолютной ошибок прогноза уровня моря.

Следует отметить, что наибольшие ошибки прогноза уровня моря наблюдались на севере и северо-западе расчетной области вблизи открытых

границ (MAE = 0,7 м). Одной из причин больших ошибок на севере и северо-западе расчетной области может быть высокая изменчивость уровня моря, вызванная неучтенными факторами (например, штормами).

Анализ результатов расчета параметров состояния морского льда

В табл. 3 представлены ошибки прогноза параметров состояния морского льда. Они осреднены за весь период моделирования 01.01.2023–01.02.2023 и по всей расчетной области.

Анализируя результаты верификации, можно сделать вывод, что наблюдались небольшое систематическое занижение рассчитанной сплоченности морского льда и переоценка скорости дрейфа льда. Завышение толщины морского льда можно объяснить занижением температуры поверхности моря в океанической модели.

Таблица 3. Ошибки прогноза параметров состояния морского льда

Table 3. Errors in forecasting sea ice conditions

Ошибка	Сплоченность, %		Толщина, м		Скорость дрейфа, м/с		Направление, град.	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-1	-1	0.04	0.03	0.24	0.23	-24	-23
MAE	6	6	0.41	0.40	0.26	0.25	51	49

Примечание. Данные авторов.

Note. The authors' data.

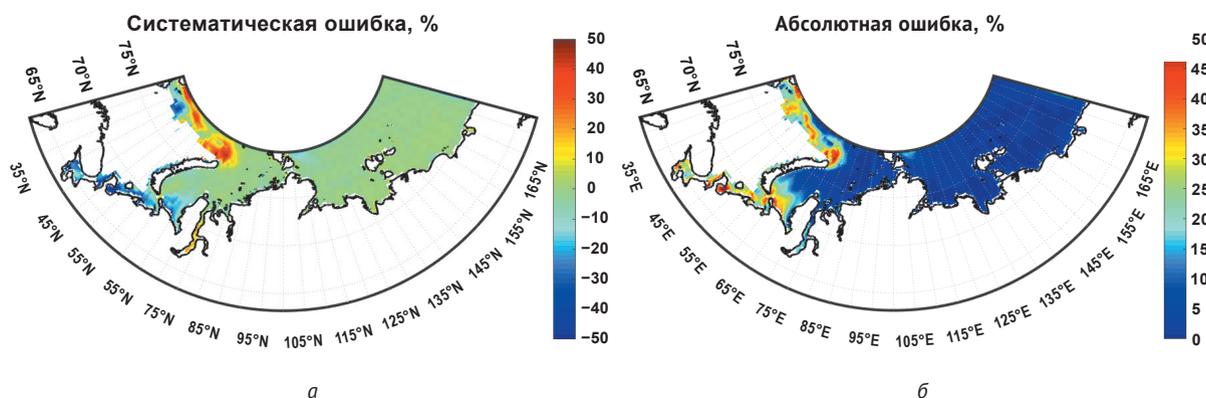


Рис. 3. Пространственное распределение ошибок прогноза сплоченности морского льда, осредненных за период 01.01.2023–01.02.2023: систематическая ошибка (а), абсолютная ошибка (б). Данные авторов

Fig. 3. Spatial distribution of sea ice concentration forecast errors averaged over the period 01.01.2023–01.02.2023: systematic error (BIAS) (a), absolute error (MAE) (b). The authors' data

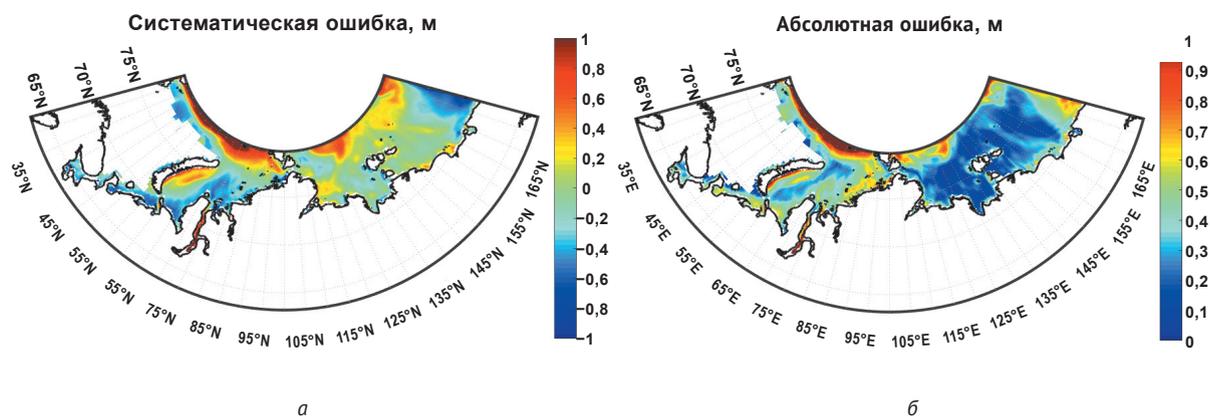


Рис. 4. Пространственное распределение ошибок прогноза толщины морского льда, осредненных за период 01.01.2023–01.02.2023: систематическая ошибка (а), абсолютная ошибка (б). Данные авторов

Fig. 4. Spatial distribution of sea ice thickness forecast errors averaged over the period 01.01.2023–01.02.2023: systematic error (BIAS) (a), absolute error (MAE) (b). The authors' data

На рис. 3 представлено осредненное за весь период моделирования пространственное распределение систематической и абсолютной ошибок прогноза сплоченности морского льда.

Анализ рис. 3 позволяет сделать вывод, что наибольшие ошибки прогноза сплоченности морского льда (до 50%) наблюдались в западной части расчетной области, а именно для северной части Баренцева моря, Чешской губы и пролива Карские Ворота. Для

Чешской губы и пролива Карские Ворота наблюдалось систематическое занижение спрогнозированной сплоченности морского льда. Для остальных районов расчетной области ошибки близки к нулю.

На рис. 4 представлено пространственное распределение ошибок прогноза толщины морского льда в Арктической зоне России.

Анализируя пространственное распределение ошибок прогноза толщины морского льда, можно

Проблемы Северного морского пути

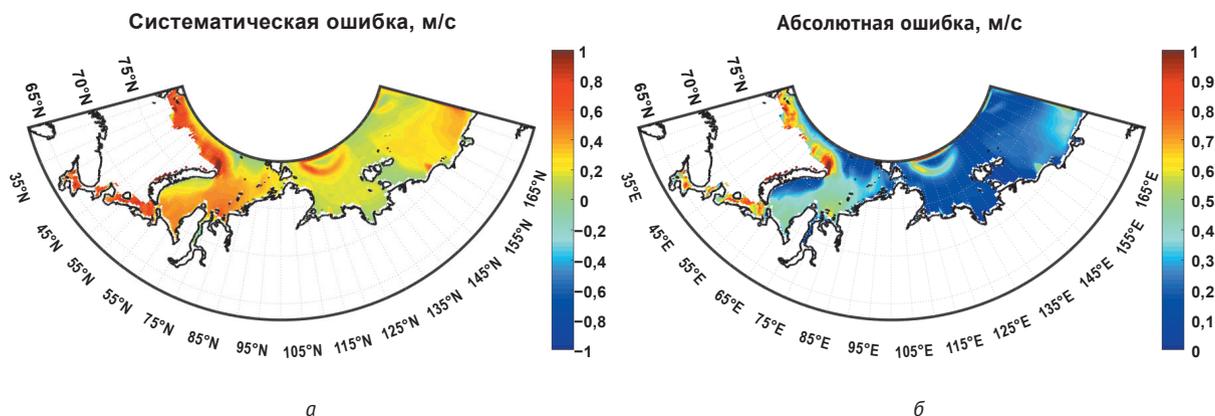


Рис. 5. Пространственное распределение ошибок прогноза скорости дрейфа морского льда, осредненных за период 01.01.2023–01.02.2023: систематическая ошибка (а), абсолютная ошибка (б). Данные авторов
 Fig. 5. Spatial distribution of sea ice speed forecast errors averaged over the period 01.01.2023–01.02.2023: systematic error (BIAS) (а), absolute error (MAE) (б). The authors' data

сделать вывод, что наибольшие ошибки толщины морского льда наблюдались на северо-западе расчетной области вблизи открытой границы и у восточного берега архипелага Новая Земля.

На рис. 5 представлено пространственное распределение ошибок прогноза скорости дрейфа морского льда.

Из рис. 5 видно, что максимальные ошибки скорости дрейфа льда наблюдались вблизи границы лед/открытая вода, что может быть связано с тем, что в этом районе возникает сильный контраст между практически неподвижным льдом и относительно быстрым движением воды. На границе лед/открытая вода лед также может ломаться, образуя мелкие фрагменты, движущиеся с разными скоростями. Подвижные льдины взаимодействуют друг с другом, создавая сложные и нелинейные эффекты. Таким образом, описанные выше процессы создают сложные условия для моделирования на границе лед/открытая вода.

Выводы

1. В рамках исследования была реализована система прогноза морского льда и состояния океана, получены первые результаты расчетов и проведена их верификация, которая показала, что, учитывая сложность арктического региона для численного моделирования, результаты расчета параметров состояния океана и морского льда в целом удовлетворительно согласуются с эмпирическими данными. Однако следует отметить ошибки в прогнозе температуры поверхности моря в свободной ото льда западной части расчетной области.

2. Возможные решения — учет двухстороннего взаимодействия между океаном и атмосферой путем связывания атмосферной модели с моделями океана и льда в единую систему WRF-ROMS-CICE и увеличение пространственного разрешения моделей.

3. Улучшению качества прогноза температуры поверхности моря может также способствовать расширение расчетной области на запад для того, чтобы обеспечить лучшее описание притока теплых вод из северной Атлантики в акваторию Баренцева моря. Еще одним путем улучшения качества прогноза параметров океана и ледовых характеристик может стать внедрение ассимиляции данных наблюдений с буев и судов, а также спутников.

4. Результаты расчетов состояния океана и морского льда по модели ROMS-CICE могут быть полезны для судоходных компаний и операторов Северного морского пути при оптимизации маршрутов, снижении рисков ледовых повреждений и планировании навигации, включая работу ледоколов. Такие расчеты также необходимы для развития арктической логистики и инфраструктуры, позволяя обеспечивать бесперебойную работу портов и планировать строительство объектов с учетом ледовой обстановки. Нефтегазовые компании могут применять эти данные для анализа рисков, обеспечения безопасности морских платформ, а экологические организации — для мониторинга изменений ледового покрова и его влияния на экосистемы.

Литература/References

1. Потравный И. М., Елсаков В. В. Анализ тенденций развития традиционных промыслов коренных народов в условиях климатических изменений (на примере Новосибирских островов и прибрежных арктических районов Якутии) // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2. — С. 301—311. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-301-311.
 Potravny I. M., Elsakov V. V. Analysis of trends in the development of traditional trades of indigenous peoples in the context of climate change (using the example of the Novosibirsk Islands and the coastal Arctic regions of Yakutia). *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 301—311. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-301-311. (In Russian).

2. Кузнецов М. В., Гецов А. А., Лукина С. М. Проблемные вопросы, связанные с необходимостью преодоления последствий радиационных загрязнений экосистемы Арктической зоны Российской Федерации // *Инновац. наука.* — 2023. — № 3—1. — С. 51—52.
- Kuznetsov M. V., Getsov A. A., Lukina S. M. Problematic Issues Related to the Need to Overcome the Consequences of Radioactive Contamination of the Ecosystem in the Arctic Zone of the Russian Federation. *Innovative Science*, 2023, no. 3—1, pp. 51—52. (In Russian).
3. Kumar R., Li J., Hedstrom K., Babanin A. V., Tang Y. Inter-comparison of Arctic sea ice simulation in ROMS-CICE and ROMS-Budgell. *Polar Sci.*, 2021, 29, p. 100716. DOI: 10.1016/j.polar.2021.100716.
4. Ushakov K. V., Grankina T. B., Ibrayev R. A., Gromov I. V. Simulation of Arctic and North Atlantic ocean water and ice seasonal characteristics by the INMIO-CICE coupled model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 48, p. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012013.
5. Johnson M. et al. Evaluation of Arctic Sea Ice Thickness Simulated by AOMIP Models. [S. l.], 2011.
6. Johnson M. et al. A comparison of Arctic Ocean sea ice concentration among the coordinated AOMIP model experiments. [S. l.], 2007.
7. Hedstrom K. S. Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (Version 5). 2010. Available at: https://www.myroms.org/wiki/images/3/3b/Manual_2010.pdf.
8. CICE Consortium. CICE Documentation. Version 6.2.0. 2021. Available at: <https://cice-consortium-cice.readthedocs.io/>.
9. Thompson G., Field P. R., Rasmussen R. M., Hall W. D. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Pt. II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, 136, pp. 5095—5115. DOI: 10.1175/2008MWR2387.1.
10. 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. DOI: 10.1029/2008JD009944.
11. Nakanishi M., Niino H. An improved Mellor–Yamada level 3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advecting fog. *Bound. Layer Meteorol.*, 2006, 119, pp. 397—407. DOI: 10.1007/s10546-005-9030-8.
12. Niu Guo-Yue, Yang Zong-Liang, Mitchell K. E., Chen Fei, Ek M. B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Youlong. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah–MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.*, 2011, p. 116.
13. Kain J. S. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteorol.*, 2004, 43, pp. 170—181. DOI: 10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCP AU>2.0.CO;2.
14. 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, pp. 81—113.
15. Chapman D. C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. *J. Phys. Oceanogr.*, 1985, 15, pp. 1060—1075.
16. Orlandi I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *J. Comp. Sci.*, 1976, 21 (3), pp. 251—269.
17. Bitz C. M., Lipscomb W. H. An energy-conserving thermodynamic sea ice model for climate study. *J. Geophys. Res. Oceans*, 1999, 104 (C7), pp. 15669—15677.
18. Marchesiello P., McWilliams J. C., Shchepetkin A. F. Open boundary conditions for long-term integration of regional ocean models. *Ocean Modelling*, 2001, 3, pp. 1—20.

Информация об авторах

Бутаков Никита Юрьевич, инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: nikita.butakov.2019@mail.ru.

Рубинштейн Константин Григорьевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: k.g.rubin@googlemail.com.

Игнатов Роман Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: prognozt@gmail.com.

COMPUTATION OF OCEAN AND SEA ICE STATE PARAMETERS FOR THE ARCTIC

Butakov, N. Yu., Rubinstein, K. G., Ignatov, R. Yu.

Nuclear Safety Institute of the Russia Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on November 25, 2024

For citing

Butakov N. Yu., Rubinstein K. G., Ignatov R. Yu. Computation of ocean and sea ice state parameters for the Arctic. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 2, pp. ?—?. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-?-?. (In Russian).

Abstract

The authors have implemented a coupled system for forecasting ocean and sea ice parameters for the Northern Sea Route area. They have used the ROMS model to calculate ocean parameters, and the CICE model to calculate sea ice parameters. The quality of the first calculation results has been evaluated. The evaluation of the calculation quality has shown that the calculation results generally agree satisfactorily with the empirical data, but there are errors in the sea surface temperature forecast in the west of the calculation area. The ROMS-CICE model calculations can help shipping companies and the Northern Sea Route operators in optimizing routes and reducing risks associated with sea ice, assist in developing Arctic logistics and infrastructure, and ensure the safety of oil and gas facilities. Environmental organizations can use this data to monitor ice cover and its impact on ecosystems.

Keywords: *sea ice, ocean, Northern Sea Route, Arctic, numerical modeling.*

Information about the authors

Butakov, Nikita Yurievich, Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, Russia, 115191), e-mail: nikita.butakov.2019@mail.ru.

Rubinstein, Kosntantin Grigorievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, Russia, 115191), e-mail: k.g.rubin@googlemail.com.

Ignatov, Roman Yurievich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, Russia, 115191), e-mail: prognozist@gmail.com.

© Butakov N. Yu., Rubinstein K. G., Ignatov R. Yu., 2025