

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-57-70>

УДК 551.467

## **Моделирование характеристик ледяного покрова Каспийского моря на основе модели CICE**

***Е.С. Нестеров, В.Д. Жупанов, А.В. Федоренко***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
nesterov@mecom.ru*

Выполнено моделирование характеристик ледяного покрова в северной части Каспийского моря на основе модели CICE (Community Ice CodE). Описана общая структура модели и опыт ее использования в оперативной практике ведущих прогностических центров. Выполнены расчеты характеристик ледяного покрова в северной части Каспийского моря для четырех зимних сезонов (октябрь–март) в 2005–2009 годах. Рассчитаны значения сплоченности и толщины льда. Сравнение результатов расчета с данными наблюдений показало, что модель удовлетворительно воспроизводит процессы нарастания и таяния льда.

*Ключевые слова:* Каспийское море, ледяной покров, модель CICE, сплоченность и толщина льда

## **Modeling the characteristics of the Caspian Sea ice cover based on the CICE model**

***E.S. Nesterov, V.D. Zhupanov, A.V. Fedorenko***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
nesterov@mecom.ru*

The characteristics of the ice cover in the northern part of the Caspian Sea are simulated using the CICE model. The general structure of the model and the experience of its operational application in leading forecast centers are described. Calculations of the ice cover characteristics in the northern Caspian Sea for four winter seasons (October–March) in 2005–2009 are performed. The values of ice concentration and ice thickness are calculated. The comparison of the calculation results with observational data showed that the model satisfactorily reproduces the processes of ice build-up and melting.

*Keywords:* Caspian Sea, ice cover, CICE model, ice concentration and ice thickness

### **Введение**

Ледяной покров Каспийского моря формируется в основном в Северном Каспии и оказывает существенное влияние на судоходство и добычу углеводородов. Ледовый сезон в Северном Каспии обычно продолжается с ноября по март [4, 5]. Однако сроки начала и окончания ледового сезона

могут сдвигаться на месяц и более в зависимости от атмосферных процессов. Опасными ледовыми явлениями считаются [1]:

- суровые зимы, когда вся акватория Северного Каспия покрывается толстым неподвижным льдом – припаем;
- появление льда в море и каналах раньше 15 ноября (средняя многолетняя дата закрытия летней навигации в Северном Каспии);
- интенсивный дрейф, подвижки, заторы и торошение льда;
- быстрое обледенение судов и гидротехнических сооружений.

Для прогноза характеристик ледяного покрова Каспийского моря до настоящего времени обычно использовались методы, основанные на статистических связях между метеорологическими и ледовыми параметрами. В качестве примера можно привести метод краткосрочного прогноза нарастания толщины льда в северо-восточной части Каспийского моря, основанный на зависимости между суммой отрицательных температур воздуха и толщиной льда [6]. Долгосрочные прогнозы основаны на статистических связях между характеристиками температуры воздуха и давления над различными районами Северного полушария и характеристиками ледовых процессов в Каспийском море [3].

Однако в последнее время для прогноза характеристик ледовых процессов стали использоваться гидродинамические модели. В [2] описан опыт применения модели CICE (Community Ice CodE) для прогноза на 5–10 суток характеристик ледяного покрова в Беринговом море. Представлены результаты прогнозов сплоченности льда, ледовитости моря, а также дат первого появления льда, устойчивого ледообразования и полного очищения для зимнего сезона 2018/2019 г. Прогнозы сравнивались с картами ледовой обстановки Национального ледового центра США и ФГБУ «НИЦ «Планета», построенными на основе спутниковой информации. Получено, что с увеличением заблаговременности качество прогнозов падает. Так, если в прогнозе сплоченности льда на 5 суток положение кромки льда воспроизводится удовлетворительно, то с заблаговременностью 9 суток ошибка в положении кромки может достигать 30–60 миль.

В [8] для краткосрочного прогноза характеристик льда в Северном Ледовитом океане и прилегающих к нему акваторий использовалась модель динамики и термодинамики морского льда, реализованная на основе упрощенного алгоритма модели CICE с циклическим усвоением спутниковых данных по температуре поверхности океана и сплоченности льда.

В [7] представлены результаты прогноза на сутки сплоченности ледяного покрова Каспийского моря в феврале 2017 г. Для прогноза использовалась совместная модель циркуляции океана и эволюции морского льда [9], позволяющая рассчитывать толщину и сплоченность льда, а также скорость дрейфа льда. Сопоставление прогноза с анализом ледовой обстановки на основе спутниковой информации показало, что модель адекватно воспроизводит структуру ледяного покрова в Северном Каспии, в том числе положение кромки льда в прибрежных районах.

Основной целью наших исследований является создание технологии оперативного прогноза ледовых условий в Каспийском море на срок до 10 суток на основе модели CICE. Но прежде было необходимо оценить, насколько успешно модель воспроизводит изменения основных ледовых характеристик (сплоченность и толщина льда, сроки замерзания и очищения моря ото льда) в течение зимнего сезона.

В данной статье приводятся результаты опытного применения модели CICE для моделирования ледовых характеристик в зимние сезоны 2005–2008 годов.

### **Развитие модели CICE и ее использование в оперативных прогностических системах**

Большинство систем параметризации и моделирования морского льда, разработанных в последние годы, были собраны научным сообществом и интегрированы в сложные модели морского льда, наиболее совершенной и полной из которых, по-видимому, является модель морского льда CICE, разработанная Е. Ханке (E. Hunke) в Лос-Аламосе (США) [12, 17]. Программное обеспечение общего доступа модели CICE распространяется в сочетании с пакетом Iserack, набор физических параметров которого учитывает термодинамические и динамические подсеточные процессы, обычно не разрешаемые другими моделями. Благодаря эффективности, пакет Iserack нашел применение в моделях океана и морского льда, отличных от CICE [19]. Модульная реализация программного обеспечения CICE позволяет пользователям варьировать сложность конкретной модели морского льда в зависимости от назначения и применяемого набора активных и пассивных индикаторов, описывающих состояние морского льда как в совместных океан – атмосфера моделях климата, так и в самостоятельных моделях динамики ледяного покрова.

Для учета изменений толщины морского льда, обычно наблюдаемых в подсеточных масштабах, в модели CICE выполняется дискретизация ледяного покрова на несколько классов, каждый из которых представляет диапазон толщины морского льда и описывает эволюцию распределения толщины льда во времени и пространстве. В дополнение к распределению толщины льда, CICE включает в себя дополнительную возможность для распределения льдин по размерам. Горизонтальный размер льдины может изменяться в результате вертикального и бокового роста и таяния, замораживания нового льда, разрушения волнами и т. д.

В CICE морской лед и снег разделены на пять категорий толщины; в каждой из которых есть четыре слоя льда и один слой снега (эти настройки являются настройками CICE по умолчанию). Для каждого слоя льда и снега изменения толщины происходят в результате термодинамических процессов, включая радиационные, турбулентные и тепловые потоки, вычисляемые с помощью термодинамической модели. Модельное распреде-

ление толщины льда изменяется во времени из-за термодинамических и динамических процессов и обновляется с использованием схемы изменения толщины льда. Динамические процессы включают дрейф льда, адвекцию сплоченности и параметризацию торошения.

В Канадском метеорологическом центре разработана Глобальная система прогнозирования ледяного покрова океана (GIOPS), которая предоставляет ежедневные глобальные анализы характеристик льда и океана и 10-дневные прогнозы на сетке с разрешением  $1/4^\circ$  [20]. Система GIOPS работает в режиме реального времени с 2011 года. Используемая численная модель представляет собой модель океана со льдом, основанную на моделях NEMO версии 3.1 и CICE версии 4.0. Модель CICE вычисляет эволюцию распределения толщины ледяного покрова в ячейках сетки. Распределение толщины изменяется в результате термодинамических и динамических процессов. Используются 10 категорий толщины: 10, 15, 30, 50, 70, 120, 200, 400 и 600 см. Пять дополнительных категорий позволяют более подробно представить как очень тонкий лед (менее 1 м), так и более толстый многолетний лед. Динамический компонент вычисляет поле скоростей, явно решая двумерное уравнение движения льда с использованием упруго-вязко-пластической реологии (EVP). Термодинамический компонент вычисляет рост/таяние снега и льда и профиль температуры по вертикали, решая уравнение диффузии тепла. Атмосферное воздействие для NEMO-CICE берется из Глобальной системы детерминированного прогнозирования GDPS, которая в настоящее время имеет разрешение 25 км. 10-дневные прогнозы, выполнявшиеся еженедельно с 12 января по 28 декабря 2011 года, оценивались на основе анализа льда 3D-Vag. Прогнозы показывают значительное снижение среднеквадратической ошибки в сплоченности льда в течение всего 10-дневного прогноза. Рост ошибок происходит быстрее в течение первых нескольких дней и постепенно уменьшается со временем. Для Арктики наиболее успешны прогнозы в Беринговом море, море Лабрадор/Баффиновом заливе и Баренцевом море.

В военно-морском флоте США с 2013 года действует система ACNFS (Arctic Cap Nowcast/Forecast System), в которой в качестве модели морского льда используется модель CICE версии 4.0, связанной с гибридной координатной моделью океана HYCOM. Ежедневно выпускаются прогнозы на 7 дней арктического морского льда [13]. Прогнозы включают сплоченность и толщину льда, скорость дрейфа льда, температуру, соленость и течения на поверхности моря. Оценки прогнозов сплоченности льда сосредоточены на областях, где сплоченность изменяется за неделю на 65 % или более, и поэтому ограничены в основном пограничной ледовой зоной.

В ACNFS модель CICE и модель океана HYCOM имеют двустороннюю связь через платформу Earth System Modeling Framework. Модели CICE и HYCOM запускаются индивидуально и обмениваются данными каждый модельный час. Толщина льда, потоки и напряжения передаются

в HYCOM из CICE, в то время как температура, соленость и течения на поверхности моря передаются из HYCOM в CICE. Атмосферное воздействие для ACNFS обеспечивается глобальной атмосферной моделью NAVGEM с разрешением  $0,28^\circ$  и включает с дискретностью 3 часа температуру воздуха на 2 м, влажность, коротковолновое и длинноволновое излучение, осадки, зональную и меридиональную скорости ветра на 10 м, среднее давление на уровне моря и точку росы. Прогнозы за период с февраля 2014 по июнь 2015 года показали удовлетворительное качество на срок до 102 ч. Прогностическая кромка льда, определяемая как сплоченность 5 %, сравнивалась с независимо полученными данными. Анализ проводился для семи районов. Наилучший результат был получен для Баренцева моря, где ошибка в положении кромки льда при прогнозе на 6 ч составляла до 30 км, при прогнозе на 126 ч – до 40 км. Хуже всего результат оказался для Канадского архипелага, где ошибка в положении кромки льда при прогнозе на 6 ч составляла до 60 км, при прогнозе на 126 ч – до 80 км.

Разработанная для ледовых прогнозов Метеослужбы Великобритании (Met Office) система FOAM (Forecast Ocean Assimilation Model) включает модель CICE для определения пространственной и временной эволюции распределения толщины льда за счет адвекции, термодинамического роста, таяния и др. В каждой точке сетки модели ледяной покров разделен на пять категорий толщины (нижние границы: 0; 0,6; 1,4; 2,4; 3,6 м) [10]. Термодинамический рост и таяние морского льда рассчитываются с использованием термодинамической модели нулевого слоя с одним слоем льда и одним слоем снега, а динамика льда рассчитывается с использованием упруго-вязко-пластической реологии. Результаты расчетов для Арктики указывают на хорошее совпадение осредненных за 50-летний период моделирования значений сплоченности и толщины льда с эквивалентными 11-летними данными наблюдений в марте и сентябре 1995–2004 гг. [16].

Модель CICE, адаптированная для трехполярной вычислительной сетки типа ORCA025, была применена также и в модели океана NEMO со связью NEMO-CICE [15], обеспечивающей формирование в NEMO необходимых приземных метеорологических данных и последующее обращение к CICE. Качество ледовых прогнозов в данном случае оценивалось с учетом площади льда, т. е. общей площади всех точек сетки океана со сплоченностью льда не менее 15 %. Результаты показывают, что эволюция прогнозируемой площади льда в целом соответствует фактической, однако модель занижает скорость таяния льда в июле и завышает скорость нарастания в январе, при этом прогнозы для апреля и октября показывают хорошее согласие с анализом.

Широкое использование модели CICE вызвано тем, что она является вычислительно эффективной для моделирования роста, таяния и движения морского льда, а также благодаря ее обширной пользовательской базе

и документации. Модель CICE используется более чем в 20 странах для исследования ледовых процессов и их взаимодействия с климатической системой в моделях из проектов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), а также в оперативных прогностических центрах различных стран. Доступные в свободном доступе версии пакета CICE реализованы на языке Fortran90 и адаптированы для работы на вычислительных платформах, использующих MPI и OpenMP параллельные вычисления в среде UNIX\LINUX операционных систем. В [17] приведены результаты инициированной консорциумом CICE независимой оценки качества пяти различных применений (автономная (standalone) и совместная (coupled)) модели CICE, включая бета-версию последнего 6-го пакета, тестирование которого выполнено на 17-летних данных NCEP CDAS/cfsV2 атмосферного форсинга [19] начиная с 1 октября 1998 г. По результатам тестирования программные пакеты CICE были сертифицированы для свободного распространения в научном сообществе.

### **Модификация модели CICE для расчета характеристик ледяного покрова Каспийского моря**

В отличие от широкого использования CICE в совместных моделях океан – атмосфера и региональной практики ее применения, рассмотренной в [2], для моделирования характеристик ледяного покрова в Северном Каспии на базе пакета CICE-v6.3.1 [12], сформирована версия автономной прогностической модели с биполярной ортогональной расчетной сеткой [11, 18] и анизотропной упруго-вязко-пластической реологией [14]. Такой подход позволяет выполнять численные эксперименты с использованием обширного тестового архива консорциума CICE, включающего следующие глобальные данные:

- батиметрию морского дна;
- среднемесячные значения температуры воды, солёности и течений;
- 3-часовые данные реанализа JRA55 [21] с 2005 по 2009 г. для потоков коротковолновой и длинноволновой радиации;
- направления и скорости ветра, температуры и влажности воздуха.

В статье используется конфигурация CICE с сеткой «gx1», которая включает:

- размеры сетки ( $320 \times 384$ ,  $1 \times 1^\circ$ ),
- ориентацию границ (юг-север, запад-восток),
- области расчета и граничные условия (глобус).

Начальные данные «iced\_gx1\_v5.nc» задают:

- солёность Каспия – 34 промилле,
- среднемесячные значения температуры воды.

Упруго-вязко-пластичная реология рекомендована ВМО для расчета динамики ледяного покрова под влиянием атмосферного форсинга.

В отличие от гидродинамических моделей, например INMOM, расчеты по используемой в CICE упруго-вязко-пластичной модели льда менее критичны к размерам сетки и позволяют (условие Куранта) шаг интегрирования по времени 1 час, что и подтвердили результаты расчетов для Каспийского моря.

Следует отметить, что в период 2005–2009 гг. в северо-восточной части Каспийского моря наблюдались как различные сроки начала формирования льда и продолжительности ледового периода, так и существенные колебания максимальной толщины льда, что позволяет оценить возможности адекватного учета в CICE межгодовых колебаний метеорологического форсинга при прогнозе ледовой обстановки для морей неарктической зоны. Ниже в табл. 1 приведены характеристики ледяного покрова для района пункта Большой Пешной (52° с. ш., 46.5° в. д.). Все характеристики ледяного покрова Каспийского моря, так же как карты ледовой обстановки, взяты из ледового архива отдела морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России».

**Таблица 1.** Продолжительность ледового сезона (дни) и толщина льда (см) в районе пункта Большой Пешной в 2005–2009 гг.

**Table 1.** The duration of the ice season (days) and the ice thickness (cm) in the area of the Bolshoi Peshnoi point in 2005–2009

Сезон	Ледовый сезон	Декабрь	Январь	Февраль	Март
2005/2006	90	Нет данных	10–26	16–26	Нет данных
2006/2007	113	6–12	8–15	8	8
2007/2008	132	5–17	29–45	51–60	42
2008/2009	109	5–18	22–23	20–21	18

В процессе конфигурации модели использовались в основном рекомендованные параметры за исключением следующих:

- 360 дней в году и 12 месяцев по 30 дней;
- заблаговременность прогноза – 180 дней начиная с 1 ноября;
- временной шаг осреднения результатов расчетов – 10 дней;
- значение солёности, равное 34 промилле;
- начальные данные – комплект 'iced\_gx1\_v5.nc'.

Последний параметр вынужденный, поскольку используемый в модели метод расчета начальных значений температуры воды, основанный на ее среднемесячных значениях, в аномальных, с точки зрения метеорологического форсинга, годах приводил к существенному – от 20 до 35 дней – смещению сроков начала формирования льда ввиду значительных отклонений начальных значений температуры воды от фактической

для данного года. Для согласования начальных данных температуры воды и воздуха была разработана внешняя интерактивная процедура коррекции с использованием метода прогонки. В дальнейшем, при использовании в качестве атмосферного форсинга метеорологических полей анализа и прогноза, коррекция начальных значений температуры воды будет выполняться в модели на основе характеристик подстилающей поверхности.

### Результаты моделирования характеристик ледяного покрова в Северном Каспии

Расчеты проводились для района вблизи острова Большой Пешной как наиболее презентативного для ледовых условий Северного Каспия [6]. Одними из рассчитываемых характеристик являлись даты образования льда и очищения моря ото льда. По многолетним наблюдениям, наиболее ранней датой ледообразования в этом районе является 17.10.1976 г., а наиболее поздней – 28.12.2005 г., наиболее ранняя дата очищения – 1.03.2002 г., а наиболее поздняя – 21.04.1956 г. [4]. Разность между датами образования и очищения считается продолжительностью ледового сезона. Для рассматриваемого района наименьшая продолжительность (83 дня) была в сезоне 2003/2004 гг., а наибольшая (148 дней) – в сезоне 1993/1994 гг. [4].

Качество моделирования оценивалось путем сравнения рассчитанных и фактических дат замерзания и очищения, а также величин и дат формирования максимальной толщины льда (табл. 2).

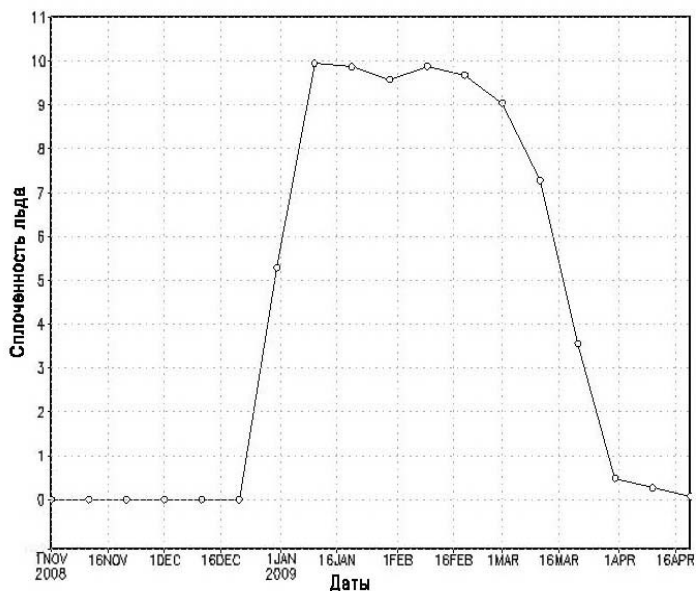
**Таблица 2.** Рассчитанные и фактические характеристики ледяного покрова для пункта Большой Пешной в 2005–2009 гг.

**Table 2.** Calculated and actual characteristics of the ice cover for the Bolshoi Peshnoi point in 2005–2009

Период наблюдения		Характеристика ледяного покрова		
		Дата замерзания	Дата очищения	Максимальная толщина (см) и дата
2005/2006	Расчет	1.01.2006	8.04.2006	30–32 (18.01.2006)
	Факт	28.12.2005	4.04.2006	26 (21–30.01.2006)
2006/2007	Расчет	18.12.2006	8.04.2007	25 (1.03.2007)
	Факт	20.12.2006	24.03.2007	15 (1–10.01.2007)
2007/2008	Расчет	13.12.2007	17.04.2008	45–47 (1.03.2008)
	Факт	13.11.2007	25.03.2008	60 (11–20.02.2008)
2008/2009	Расчет	18.12.2008	5.04.2009	27–28 (18.01.2009)
	Факт	19.12.2008	27.03.2009	21 (1–10.02.2009)



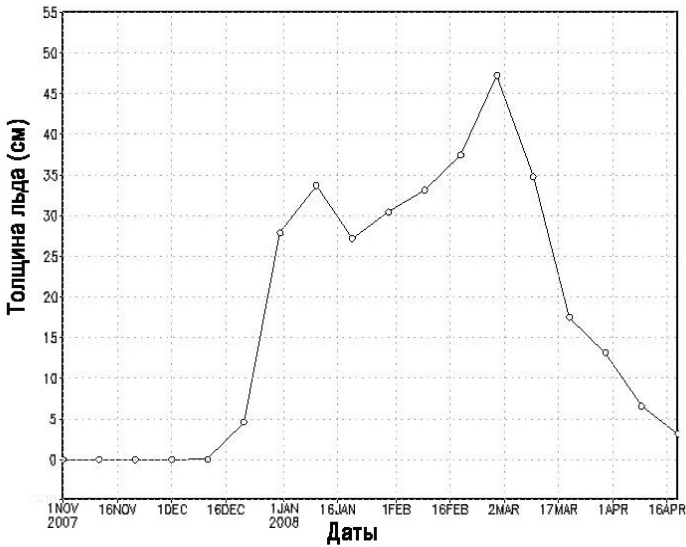
Даты замерзания и очищения в табл. 2 определялись по расчетам сплоченности льда. В трех случаях (2005, 2006 и 2008 гг.) даты замерзания были рассчитаны успешно (ошибка составила 1–4 дня), а в 2007 г. замерзание произошло ранее расчета на 30 дней. Во всех случаях очищение произошло ранее расчета на срок от 4 дней в 2006 г. до 24 дней в 2008 г. В качестве примера успешного определения даты замерзания на рис. 1 представлен расчет изменения сплоченности в сезон 2008–2009 годов.



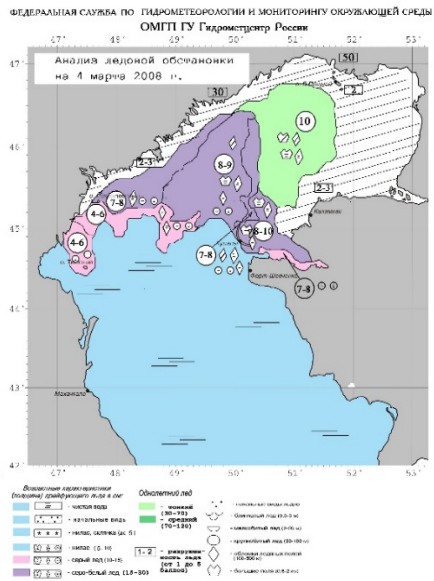
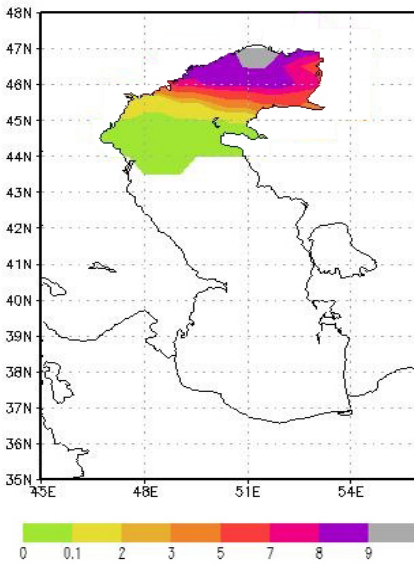
**Рис. 1.** Расчет сплоченности льда (баллы) в зимний сезон 2008/2009 гг.

**Fig. 1.** Calculation of ice concentration (points) in the winter season of 2008/2009.

Данные о фактической толщине льда имелись только по декадам. Наибольшие отличия в величине максимальной толщины и дате формирования относятся к январю–марту 2007 г., когда толщина льда была наименьшей (15 см) из четырех сезонов (по расчету 25 см). В то же время в феврале 2008 г., когда толщина была наибольшей из четырех сезонов (60 см), расчет по модели можно признать удовлетворительным как по толщине (47 см), так и по дате формирования (рис. 2). Рассчитанное распределение ледяного покрова в Северном Каспии в этот период в общих чертах похоже на анализ ледовой обстановки, полученный на основе спутниковой информации (рис. 3). Более качественного совпадения трудно ожидать, поскольку атмосферный форсинг в расчетах основан на сглаженных полях реанализа [21].



**Рис. 2.** Расчет толщины льда (см) в зимний сезон 2007/2008 гг.  
**Fig 2.** Calculation of ice thickness (cm) in the winter season of 2007/2008.



**Рис. 3.** Расчет сплоченности льда (баллы) в Северном Каспии на 1–10.03.2008 г. (слева) и анализ ледовой обстановки в Северном Каспии 4.03.2008 г. (справа).  
**Fig. 3.** Calculation of ice concentration (points) in the Northern Caspian on March 1-10, 2008 (left) and analysis of the ice situation in the Northern Caspian 4.03.2008 (right).

## Заключение

На основе численных экспериментов с моделью CICE, версия V6.3.1 которой интегрирована в программную среду суперкомпьютера Скау-ХС40 Росгидромета, показано, что модель CICE с биполярной ортогональной расчетной сеткой и анизотропной упруго-вязко-пластической реологией удовлетворительно воспроизводит межгодовые колебания характеристик ледовой обстановки для морей неарктической зоны.

Для оценки возможности использования модели CICE в оперативной практике выполнены расчеты с использованием в качестве атмосферного форсинга полей реанализа [21]. Для периода декабрь–апрель 2005–2009 гг. рассчитывались значения сплоченности льда (по которым определялись даты замерзания и очищения моря ото льда) и толщины льда.

Сравнение результатов расчета с данными наблюдений вблизи острова Большой Пешной показало, что модель удовлетворительно воспроизводит процессы нарастания и таяния льда, хотя в некоторые годы имеются существенные расхождения между рассчитанными и фактическими датами замерзания и очищения моря ото льда. Следует отметить хорошее совпадение результатов расчета максимальной толщины льда с данными наблюдений.

На следующем этапе подготовки модели к оперативному применению планируется адаптация CICE для расчета ледовой обстановки на период 10–15 суток с использованием фактических начальных полей и детализированного атмосферного форсинга.

## Список литературы

1. Бухарицин П.И. Особенности ледового режима и методы прогноза ледовых условий северной части Каспийского моря: Автореф. дис. к. г. н. Л.: ААНИИ, 1986. 20 с.
2. Вржжик А.Н. Среднесрочный прогноз ледовой обстановки Берингова моря // Известия ТИНРО. 2020. Т. 200, вып. 1. С. 131-140.
3. Думанская И.О. О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 64-77.
4. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
5. Лобанов В.А., Наурузбаева Ж.К. Климатические изменения толщины льда на северном Каспии // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 172-187.
6. Наурузбаева Ж.К., Лобанов В.А. Методика краткосрочного прогнозирования нарастания толщины льда в северо-восточном секторе Каспийского моря // Географический вестник. 2020. № 3 (54). С. 81-97.
7. Фомин В.В., Дианский Н.А., Коршенко Е.А., Выручалкина Т.Ю. Система оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических характеристик Каспийского моря и оценка точности прогнозов по данным натурных измерений // Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 49-64.
8. Фомин В. В., Панасенкова И.И., Гусев А.В., Чаплыгин А.В., Дианский Н.А. Система оперативного моделирования Северного Ледовитого океана и прилегающих к нему акваторий на основе российской модели INMOM-Арктика //

Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 2. С. 205-218. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-205-218 [in Russ.].

9. Яковлев Н. Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948-2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 3. С. 1-16.

10. Blockley E.W., Martin M.J., McLaren A.J., Ryan A.G. et al. Recent development of the Met Office operational ocean forecasting system: an overview and assessment of the new global FOAM forecasts // Geosci. Model Dev. 2014. Vol. 7. P. 2613-2638. DOI: 10.5194/gmd-7-2613-2014.

11. Bouillon S. et al. An elastic-viscous-plastic sea ice model formulated on Arakawa B and C grids // Ocean Modelling. 2009. Т. 27, № 3-4. С. 174-184.

12. CICE Documentation 2021. <https://github.com/CICE-Consortium/>

13. Hebert D.A., Allard R.A., Metzger E.J., Posey P.G. et al. Short-term sea ice forecasting: an assessment of ice concentration and ice drift forecasts using the U.S. Navy's Arctic Cap Nowcast/Forecast System // J. Geophys. Res. Oceans. 2015. Vol. 120. P. 8327-8345. DOI: 10.1002/2015JC011283

14. Hunke E. C. et al. The multiphase physics of sea ice // Sea. 2011. Vol. 5. P. 1949-1993.

15. Massonnet F. et al. On the influence of model physics on simulations of Arctic and Antarctic sea ice // The Cryosphere. 2011. Vol. 5, № 3. P. 687-699.

16. Rae J.G.L., Hewitt H.T., Keen A.B., Ridley J.K. et al. Development of the Global Sea Ice 6.0 CICE configuration for the Met Office Global Coupled model // Geosci. Model Dev. 2015. Vol. 8. P. 2221-2230.

17. Roberts A.F. et al. Quality control for community-based sea-ice model development // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2018. Vol. 376, № 2129. P. 20170344.

18. Ross J.M. Explicit Generation of Orthogonal Grids for Ocean Models // J. Computational Physics. 1996. Vol. 126. P. 251-273.

19. Saha S. et al. The NCEP climate forecast system version 2 // J. Clim. 2014. Vol. 27. P. 2185-2208.

20. Smith G.C., Roy F., Reszka M., Surcel D. et al. Sea ice forecast verification in the Canadian global ice ocean prediction system // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2016. Vol. 142. P. 659-671. DOI:10.1002/qj.2555

21. Tsujino H. et al. JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do) // Ocean Modelling. 2018. Vol. 130. P. 79-139.

22. Zampieri L., Kauker F., Fröhle J., Sumata H., Hunke E.C., Goessling H.F. Impact of sea-ice model complexity on the performance of an unstructured-mesh sea-ice/ocean model under different atmospheric forcings // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2021. Vol. 13. e2020MS002438. <https://doi.org/10.1029/2020MS002438>

## References

1. Buharicin P.I. Osobennosti ledovogo rezhima i metody prognoza ledovykh usloviy severnoy chasti Kaspiyskogo morya: Avtoref. dis. k. g. n. L.: AANII, 1986. 20 p. [in Russ.].

2. Vrazhkin A.N. Mid-term forecast for the ice conditions in the Bering Sea. *Izvestiya TINRO*, 2020, vol. 200, no. 1, pp. 131-140. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-131-140 [in Russ.].

3. Dumanskaya I.O. On the method of long-range forecasting of ice conditions in the European seas of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 11, pp. 747–757. DOI: 10.3103/S1068373911110069.

4. Dumanskaya I.O. Ledovye usloviya morey evropeyskoy chasti Rossii. M., Obninsk: IG-SOCIN publ., 2014, 608 p. [in Russ.].

5. Lobanov V.A., Naurozbaeva Zh.K. Klimaticheskie izmeneniya tolshchiny l'da na severnom Kaspii. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2018, no. 53, pp. 172–187 [in Russ.].

6. Naurozbayeva Z. K., Lobanov V. A. Methods of short-term forecasting of ice thickness growth in the north-eastern part of Caspian sea. *Geograficheskiy vestnik [Geographical Bulletin]*, 2020, vol. 54, no. 3, pp. 81–97 [in Russ.].

7. Fomin V.V., Diansky N.A., Korshenko E.A., Vyruchalkina T. Yu. The Marine Hindcast and Forecast System for Diagnosis and Prediction of Hydrometeorological Characteristics of the Caspian Sea and Forecast Verification Based on Field Measurements. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 639–649. DOI: 10.3103/S1068373920090058.

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

9. Yakovlev N.G. Reproduction of the large-scale state of water and sea ice in the Arctic ocean in 1948–2002: Part I. Numerical model. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2009, vol. 45, no 3, pp. 357–371. DOI: 10.1134/S0001433809030098.

10. Blockley E.W., Martin M.J., McLaren A.J., Ryan A.G. et al. Recent development of the Met Office operational ocean forecasting system: an overview and assessment of the new global FOAM forecasts. *Geosci. Model Dev.*, 2014, vol. 7, pp. 2613–2638. DOI: 10.5194/gmd-7-2613-2014.

11. Bouillon S. et al. An elastic–viscous–plastic sea ice model formulated on Arakawa B and C grids. *Ocean Modelling*, 2009, vol. 27, no. 3–4, pp. 174–184.

12. CICE Documentation 2021. Available at: <https://github.com/CICE-Consortium/>

13. Hebert D.A., Allard R.A., Metzger E.J, Posey P.G. et al. Short-term sea ice forecasting: an assessment of ice concentration and ice drift forecasts using the U.S. Navy's Arctic Cap Nowcast/Forecast System. *J. Geophys. Res. Oceans.*, 2015, vol. 120, pp. 8327–8345. DOI: 10.1002/2015JC011283

14. Hunke E. C. et al. The multiphase physics of sea ice. *Sea*, 2011, vol. 5, pp. 1949–1993.

15. Massonnet F. et al. On the influence of model physics on simulations of Arctic and Antarctic sea ice. *The Cryosphere*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 687–699.

16. Rae J.G.L., Hewitt H.T., Keen A.B., Ridley J.K. et al. Development of the Global Sea Ice 6.0 CICE configuration for the Met Office Global Coupled model. *Geosci. Model Dev.*, 2015, vol. 8, pp. 2221–2230.

17. Roberts A.F. et al. Quality control for community-based sea-ice model development. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2018, vol. 376, no. 2129, pp. 20170344.

18. Ross J.M. Explicit Generation of Orthogonal Grids for Ocean Models. *J. Computational Physics*, 1996, vol. 126, pp. 251–273.

19. Saha S. et al. The NCEP climate forecast system version 2. *J. Clim.*, 2014, vol. 27, pp. 2185-2208.

20. Smith G.C., Roy F., Reszka M., Surcel D. et al. Sea ice forecast verification in the Canadian global ice ocean prediction system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2016, vol. 142, pp. 659-671. DOI:10.1002/qj.2555.

21. Tsujino H. et al. JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Modelling*, 2018, vol. 130, pp. 79-139.

22. Zampieri L., Kauker F., Fröhle J., Sumata H., Hunke E.C., Goessling H.F. Impact of sea-ice model complexity on the performance of an unstructured-mesh sea-ice/ocean model under different atmospheric forcings. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, vol. 13, e2020MS002438. DOI: 10.1029/2020MS002438

*Поступила 17.02.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;  
принята в печать 30.03.2022.*

*Submitted 17.02.2022; approved after reviewing 17.03.2022;  
accepted for publication 30.03.2022.*