

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-3-90-104>

УДК 551.467

Прогноз толщины ледяного покрова в прибрежных областях Карского и Охотского морей

В.Д. Жупанов, Е.С. Нестеров

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

На основе модели морского льда CICE с вязко-пластичной реологией выполнено моделирование ледяного покрова Обской губы и северо-западной части Охотского моря для зимних сезонов 2021/2022, 2022/2023 и 2023/2024 гг. Дано описание сезонной изменчивости характеристик ледяного покрова в этих районах, приведены примеры их численного моделирования. С использованием атмосферным форсинга на основе негидростатической атмосферной модели WRF-ARW выполнено прогнозирование изменений толщины ледяного покрова в северо-западной части Охотского моря на апрель 2024 года. Сравнение прогнозов с ледовыми картами Гидрометцентра России и измерениями толщины льда на станциях Аян и Большой Шантар дало удовлетворительные результаты.

Ключевые слова: модель морского льда CICE, ледяной покров, Обская губа, северо-западная часть Охотского моря

Forecast of ice cover thickness in coastal areas of the Kara and Okhotsk seas

V.D. Jupanov, E.S. Nesterov

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

Based on the CICE viscoplastic sea ice model, the ice cover of the Gulf of Ob and the northwestern Okhotsk Sea was simulated for the winter seasons of 2021/2022, 2022/2023, and 2023/2024. The description of the seasonal variability of sea ice characteristics in these areas and examples of their numerical modeling are given. Using atmospheric forcing based on the WRF-ARW nonhydrostatic atmospheric model, the sea ice thickness in the northwestern Okhotsk Sea was predicted for April 2024. A comparison of the forecasts with the ice maps of the Hydrometcentre of Russia and sea ice thickness measurements at the Ayan and Bolshoy Shantar stations gave satisfactory results.

Keywords: CICE sea ice model, ice cover, Gulf of Ob, northwestern Okhotsk Sea

Введение

Учет ледовых условий в прибрежных районах морей важен для судоходства и для деятельности по добыче углеводородов на шельфе. Условия формирования и эволюции ледяного покрова в прибрежных районах морей

и в их центральных областях различны. Основными причинами этого являются различия в глубинах и мезометеорологических условиях формирования атмосферного форсинга на границе суша – море. Важным фактором является соленость, которая в прибрежных районах бывает существенно меньше, чем в центральных областях морей, из-за распреснения вод в результате речного стока.

Ледовый режим Обской губы и северо-западной части Охотского моря

Стратегически важным районом Арктики является Обская губа Карского моря, где осуществляются различные энергоресурсные и транспортные проекты по строительству морских портов, морских каналов, трубопроводов и т. д. Обская губа является уникальным водным объектом, так как в течение ледового сезона здесь одновременно присутствуют пресные (пресноводные) льды и льды распресненных водоемов, а при определенных условиях образуются и морские льды. Длина Обской губы около 800 км, ширина 30–90 км, глубина на большей части акватории составляет 10–15 м [9].

Обская губа большую часть года покрыта льдом. Формирование ледяного покрова начинается в первой половине октября, а окончательное замерзание происходит во второй половине октября – начале ноября. Наиболее раннее появление льда отмечается вблизи мыса Дровяной и бухты Новый Порт [15]. В зимний период Обская губа покрывается припаем, максимальное развитие которого наблюдается в апреле – мае. В среднем толщина льда в Обской губе на конец апреля достигает 1,4–1,7 м.

Разрушение ледяного покрова начинается в конце мая в южной части Обской губы. В северной части припай взламывается в начале июня под воздействием ветра и волнения. Северная часть очищается ото льда во второй половине июля. При благоприятных условиях полное очищение ото льда наступает в июне – первой половине июля, а при неблагоприятных – в середине августа. Процесс очищения происходит гораздо интенсивнее, чем формирование льда. Так, если в начале июня 2016 г. лед покрывал почти всю акваторию губы, то к началу июля акватория была практически свободна ото льда [17]. Средняя продолжительность ледового периода – 260 суток (минимальная – 233 суток, максимальная – 286 суток) [4, 8]. Средняя дата взлома припая – 20 июня. Толщина припайного льда (станция Новый Порт) в январе – 103 см, феврале – 127 см, марте – 45 см, апреле – 155 см, мае – 155 см, июне (первая и вторая декады) – 144 см.

Оценка изменений соленостного режима в северной части Обской губы, которые могут быть вызваны изменением топографии дна в результате строительства судоходного канала, приведена в [6]. Численные эксперименты показали, что наибольшее увеличение солености в случае построения канала произойдет в районе его расположения.

Численное моделирование годовой эволюции ледового режима Обской губы для условий 2015 года выполнено на основе адаптированной к условиям губы модели Delft3D [17]. В качестве начальных условий использовалось среднемноголетнее распределение температуры и солёности воды в августе в Карском море и Обской губе. По результатам расчетов к началу ноября 2015 г. на всей акватории сформировался устойчивый ледовый режим, что соответствовало данным наблюдений.

Северная и западная части Охотского моря находятся под влиянием холодных воздушных масс с материка, поэтому ледяной покров первоначально образуется здесь, а затем в более южных районах. Средняя продолжительность ледового периода в западной части моря составляет 250 суток, в суровой зиме – 290 суток. В глубоко врезанных в сушу бухтах и заливах припай держится 140–170 суток, а у открытого побережья быстро разрушается или вообще не образуется. В отдельных районах Охотского моря лед может наблюдаться более девяти месяцев в году (акватория Шантарских островов) [5, 7, 11, 13, 14]. В этом районе, а также в Сахалинском заливе толщина льда может достигать 120 см, а в суровые зимы 130–150 см. Средняя толщина льда за период (2001–2015 гг.) у пункта Аян составляет 106 см, максимальная 151 см, у пункта о. Большой Шантар 87 и 123 см соответственно.

Первый лед появляется во второй половине октября в некоторых закрытых бухтах северной части моря, а в ноябре во всех бухтах северного побережья. Максимальное распространение ледяного покрова – в первой половине марта. Окончательное очищение моря ото льда в июле. Средняя продолжительность ледового сезона в п. Аян (северо-западная часть моря) – 186 суток, в районе Шантарских островов – 224 суток.

В самые мягкие зимы на западе и севере моря кромка льда располагается на расстоянии 150–180 миль от побережья материка. Процессы разрушения льда под воздействием солнечной радиации начинаются в крайней южной части моря в марте. В последнюю очередь (в конце июля – начале августа) лед исчезает в северо-западной части моря в районе Шантарских островов [13].

Основное препятствие для судов – «тяжелые» льды (однолетние льды сплоченностью более 8 баллов). Максимальная площадь тяжелых льдов (70 % моря) была во второй половине марта 1987 г. В северо-западном районе моря в ноябре–декабре лед сплоченностью 9–10 баллов может образоваться за 2–3 суток. В феврале в этом районе могут формироваться большие ледяные поля размером до 10 км.

В качестве примера численного моделирования ледяного покрова Охотского моря можно привести работу [16], где выполнен расчет характеристик льда за период 1986–2015 гг. с помощью моделей морской циркуляции INMOM и морского льда CICE. Атмосферный форсинг задавался на основе продукции модели COSMO-Ru. Качество воспроизведения ледовых характеристик оценивалось по данным изысканий, выполненным

ФГБУ «ГОИН» в прибрежной зоне о. Сахалин, а также по спутниковым картам льда. Получено качественное соответствие рассчитанного местоположения кромки льда данным измерений в северной и западной частях Охотского моря.

В [10] описан опыт использования численной динамико-термодинамической модели ледяного покрова, разработанной в ААНИИ, для прогноза на 5 суток распределения льдов в юго-западной части Охотского моря. Для атмосферного форсинга использовались данные глобальной атмосферной модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. Оценка достоверности прогнозов выполнялась по сплоченности льда. Прогнозы составлялись два раза в неделю в период с января по март 2013 г. В качестве исходной и контрольной информации использовались ледовые карты на основе спутниковых снимков NOAA и MODIS-TERRA. Получено, что оправдываемость прогнозов сплоченности составила 87 %.

Прогноз толщины ледяного покрова в прибрежных областях Карского и Охотского морей на основе модели CICE

В отличие от широкого использования CICE в совместных моделях океан – атмосфера [21] и региональной практики ее применения [23], для моделирования характеристик ледяного покрова в прибрежных районах Карского и Охотского морей на базе пакета CICE, версия v6.3.1 [19] сформирована версия автономной прогностической модели с биполярной ортогональной расчетной сеткой [22] и анизотропной упруго-вязко-пластической реологией [20]. Аналогичный подход был успешно применен при расчете характеристик ледяного покрова Каспийского моря для сезонов 2011/2012 гг. (продолжительный и холодный) и 2015/2016 гг. (короткий и теплый), экстремальных по таким параметрам, как продолжительность ледового сезона, сумма градусодней мороза, площадь ледяного покрова, максимальная толщина льда и др. [12]. Расчет, выполненный с использованием характеристик атмосферы реанализов JRA-55, показал, что в период максимального развития ледяного покрова в январе–феврале акватория моря покрыта льдом, сплоченность и толщина которого соответствует данным спутниковой информации и прибрежных станций.

На основе численных экспериментов с моделью CICE установлено, что продолжительность периода адаптации (Spin Up) модели CICE – согласование текущего атмосферного форсинга и начальных данных о температуре воды, рекомендованных разработчиком, может составлять 25–30 дней. Расчеты по модели CICE «от чистой воды» начиная с 1 октября расчетного сезона обоснованы по условию минимальной в этот период межгодовой изменчивости температуры воды и воздуха.

Расчет ледовых характеристик ведется с использованием базы данных начальных данных консорциума CICE, включающей батиметрию морского дна и среднемесячные значения температуры воды, солености и течений. Текущий атмосферный форсинг в формате netCDF годового архива

глобальных метеорологических полей с трехчасовым временным разрешением, эквивалентных реанализам JRA-55 [24] для потоков приходящей коротковолновой и длинноволновой солнечной радиации, направления и скорости ветра, температуры и влажности воздуха и количества осадков, рассчитывается на основе прогностических полей глобальной негидростатической модели погоды с горизонтальным пространственным разрешением 0.25° .

Численные эксперименты показали (условие Куранта), что упруго-вязко-пластическая модель льда CICE менее критична к размерам сетки и эффективна в вычислительном отношении, поскольку использует шаг интегрирования по времени 1 час.

Расчеты в указанной конфигурация модели CICE ведутся на ортогональной двухполлюсной вычислительной сетке “gx1” (320×384 , $1 \times 1^\circ$) с использованием в основном рекомендованных параметров [18], за исключением следующих:

- 360 дней в году и 12 месяцев по 30 дней;
- заблаговременность прогноза – 270 дней начиная с 1 октября;
- временной шаг интегрирования – 1 час;
- период усреднения результатов расчетов – 24 часа.

Значения солености и глубины в узлах расчетной сетки корректируются на основе доступных данных измерений. Соленость в Обской губе меняется от нулевых значений в южной части до 2–6 ‰ на границе с Карским морем, соленость которого в центральной части составляет 30–32 ‰ [1, 8]. В прибрежных районах Охотского моря соленость ниже в результате стока рек. Распреснение прибрежных вод в западной части моря больше, чем в восточной. Наиболее заметно распреснение в Тауйской губе и Сахалинском заливе, где соленость у берегов составляет 25–28 ‰, а в августе понижается до 24–25 ‰.

В модели CICE морской лед и снег разделены на пять категорий толщины; в каждой из которых есть четыре слоя льда и один слой снега. 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 распределение 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 качестве атмосферного форсинга используются прогностические поля негидростатической модели общего пользования WRF-ARW [26], которая базируется на «упругих» уравнениях, записанных в орографических координатах, и, аналогично gfs NCEP, воспроизводит атмосферные циркуляции, в которых велика роль вертикальных ускорений (конвективные движения, орографические циркуляции, атмосферные фронты). Для представления в модели микрофизических процессов используется

WRF Double-Moment 6-class параметризация, в которой учитываются как водности облаков и жидких осадков, так и ледности облаков, снега и крупы (града). Для параметризации процессов в пограничном слое используется схема Меллора – Ямады – Янича, вертикальная турбулентность в которой рассчитывается с использованием уравнения турбулентных пульсаций энергии. Расчет коротковолновой и длинноволновой радиации производится по схеме RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model) с использованием стохастической модели учета влияния облачности [2]. Для параметризации процессов на поверхности и в почве используется схема NOAH-MP [25] как наиболее универсальная из всех параметризаций этого типа.

Начальные условия для атмосферной модели WRF-ARW берутся из анализов gdas NCEP [<https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/>]. Для подготовки начальных условий используется информация о геопотенциале, температуре, влажности, горизонтальных компонентах скорости, температуре подстилающей поверхности, приземном давлении, температуре почвы, водном эквиваленте снежного покрова, альбедо подстилающей поверхности, доле растительного покрова, рельефе, а также маска вода – суша с пространственным разрешением 0.25° . Вертикальная скорость, а также все переменные, характеризующие гидрометеоры, в начальный момент равны нулю. Оценка качества прогнозирования моделью WRF-ARW больших конвективных систем показала, что максимальные суммы осадков за 12 ч и максимальный ветер на высоте 10 м близки к наблюдаемым [3].

Прогностические поля используемой модели погоды содержат около 200 наименований переменных, характеризующих состояние атмосферы, подстилающей поверхности и почвы, включая гидрологические характеристики типа поверхностного и грунтового стока. Инструментарий ввода\вывода, который обеспечивает возможность работы с метеорологическими данными в форматах GRIB1, GRIB2 и netCDF и интерполяцию переменных с модельных уровней на изобарические поверхности или геометрические высоты различных пространственных сеток, используется для формирования в формате netCDF атмосферного форсинга, включающего приземные метеорологические поля температуры, ветра, осадков и радиационных потоков для текущего сезона с трехчасовым временным разрешением, интерполированных на двухполосную ортогональную расчетную сетку.

На основе интегрированной в программную среду суперкомпьютера Cray-XC40 Росгидромета вязко-пластичной модели динамики морского льда CICE с атмосферным форсингом, использующим прогностические поля глобальной негидростатической атмосферной модели WRF-ARW, выполнено моделирование ледяного покрова Обской губы и северо-западной части Охотского моря для 2021/2022, 2022/2023 и 2023/2024 гг. Прогноз параметров ледяного покрова зимнего сезона рассчитывается с текущим атмосферным форсингом (на примере прогноза по исходным данным от 1 декабря на зимний сезон 2023/2024 гг.):

01.10.2023 – 01.11.2023 – поля анализов текущего года;
 01.11.2023 – 16.11.2023 – прогностические поля атмосферной модели
 WRF-ARW заблаговременностью 384 часа.

Расчет толщины льда в Обской губе

Для рассматриваемого периода регулярные наблюдения толщины льда в Обской губе проводились только на станции Новый Порт (табл. 1). Ранее наблюдения толщины льда в Обской губе проводились также на станции Тамбей, расположенной в северной части губы. Однако эта станция в 2009 г. была закрыта. Интересно сравнить значения толщины льда на этих станциях до 2009 г. Так, в мае 1995 г. средняя толщина льда на станции Новый Порт была 122 см, а на станции Тамбей – 175 см, то есть на 53 см больше. По расчетам на май 2022 г. толщина льда на станции Новый Порт составила 160 см, а на станции Тамбей – 195 см, то есть на 35 см больше. Это подтверждает увеличение толщины льда в Обской губе с юга на север.

Таблица 1. Среднемесячные значения толщины льда на станции Новый Порт (см)

Table 1. Mean monthly ice thickness at Novy Port station (cm)

		Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
2021/2022	Факт	52	83	117	141	149
	Расчет	70	90	110	120	130
2022/2023	Факт	62	93	125	147	163
	Расчет	80	105	115	140	160
2023/2024	Факт	65	107	140	163	–
	Расчет	70	105	90	110	140

Из табл. 1 следует, что в случае значительной толщины льда в феврале-апреле (117–163 см) рассчитанная толщина льда оказалась меньше фактической. Подобный результат был получен также в [17].

На основе изложенного выше метода были рассчитаны изменения толщины ледяного покрова в 2021–2024 гг. в трех пунктах Обской губы, расположенных в северной (Тамбей), средней (Новый Порт) и в южной (Нида) частях губы (рис. 1).

Средняя рассчитанная толщина льда за сезон 2022/2023 гг. (120 см) оказалась больше, чем за сезон 2021/2022 гг. (104 см) и сезон 2023/2024 гг. (103 см). Одной из причин этого могла быть меньшая средняя толщина снежного покрова в декабре-январе 2022/2023 гг. (10 см), чем в эти же месяцы в 2021/2022 гг. (18 см) и 2023/2024 гг. (16 см), что привело к более интенсивному нарастанию льда.

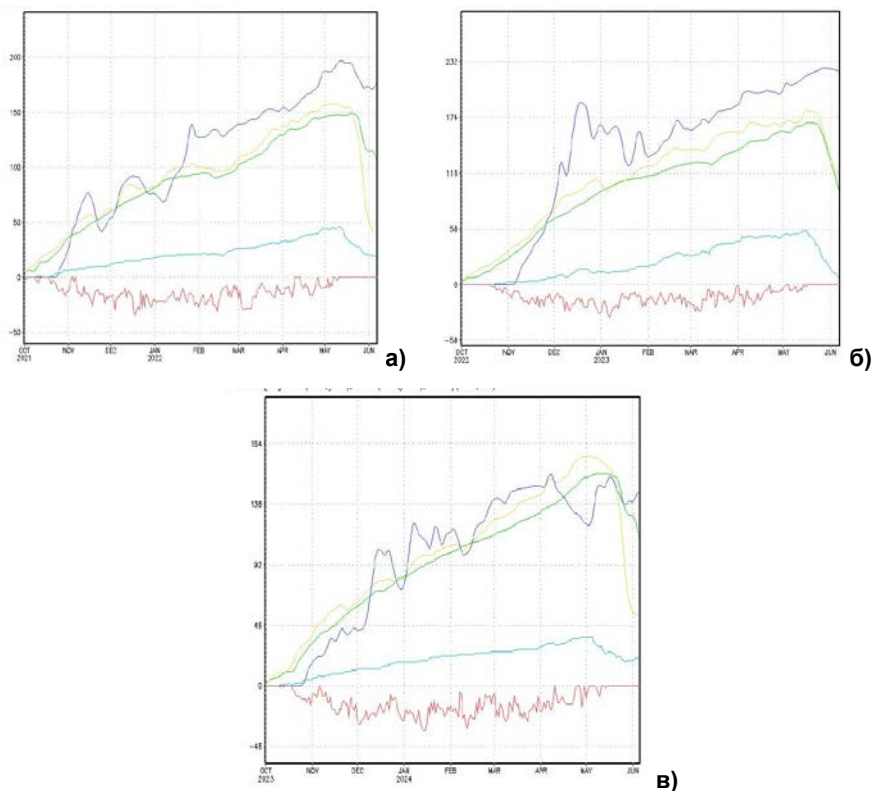


Рис. 1. Расчет толщины ледяного покрова (см) в зимние сезоны 2021/2022 (а), 2022/2023 (б), 2023/2024 гг. (в) в пп. Тамбей (синий цвет), Новый Порт (желтый цвет), Нида (зеленый цвет). Красный цвет – температура воздуха (°C), голубой цвет – толщина снега на льду (см).

Fig 1. Calculation of ice cover thickness (cm) in the winter seasons 2021–2022 (a), 2022–2023 (б), 2023–2024 (в) in Tambay (blue colour), Novy Port (yellow colour), Nida (green colour). Red colour – air temperature (°C), blue colour - snow thickness on ice (cm).

Расчет толщины льда в северо-западной части Охотского моря

Для рассматриваемого периода регулярные наблюдения толщины льда в северо-западной части Охотского моря проводились на станциях Аян и Большой Шантар (табл. 2 и 3). На основе изложенного выше метода были рассчитаны изменения толщины ледяного покрова на этих станциях в 2021–2024 гг. Из табл. 2 и 3 следует, что если на станции Аян рассчитанная толщина льда в марте–апреле меньше фактической, то на станции Большой Шантар ситуация противоположная.

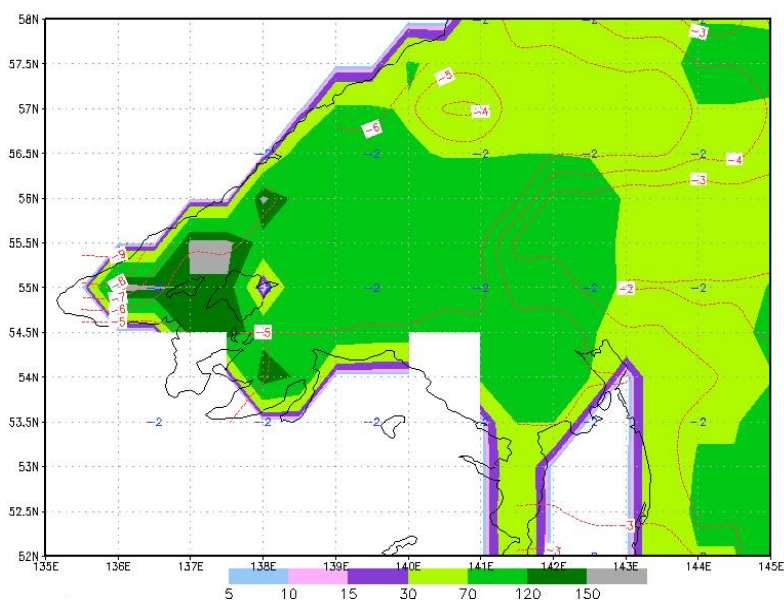
Также было спрогнозировано распределение толщины ледяного покрова в северо-западной части Охотского моря на 07.04.2024 (рис. 2), которое сравнивалось с ледовой картой ФГБУ «Гидрометцентр России» за 05.04.2024 (рис. 3).

Таблица 2. Среднемесячные значения толщины льда на станции Аян (см)**Table 2.** Mean monthly values of ice thickness at Ayan station (cm)

		Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
2021/2022	Факт	–	68	94	107	–	–
	Расчет	0-60	60-85	85-100	100-105	105-100	105-80
2022/2023	Факт	–	85	109	131	128	–
	Расчет	10-60	60-90	90-105	105-110	110-115	115-90
2023/2024	Факт	–	90	122	136	144	–
	Расчет	45-80	80-110	110-130	130-135	135-130	130-105

Таблица 3. Среднемесячные значения толщины льда на станции Большой Шантар (см)**Table 3.** Monthly averages of ice thickness at Bolshoy Shantar station (cm)

		Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
2021/2022	Факт	52	70	82	–	–	–
	Расчет	0-50	50-65	65-80	70-70	75-65	65-45
2022/2023	Факт	–	56	64	64	64	–
	Расчет	0-40	40-45	45-60	60-75	75-75	75-50
2023/2024	Факт	36	59	77	90	92	–
	Расчет	40-60	60-90	90-95	95-115	115-125	125-85

**Рис. 2.** Прогноз толщины льда в северо-западной части Охотского моря на 07.04.2024 (см).**Fig.2.** Forecast of ice thickness in the northwestern part of the Sea of Okhotsk for 07.04.2024 (cm)

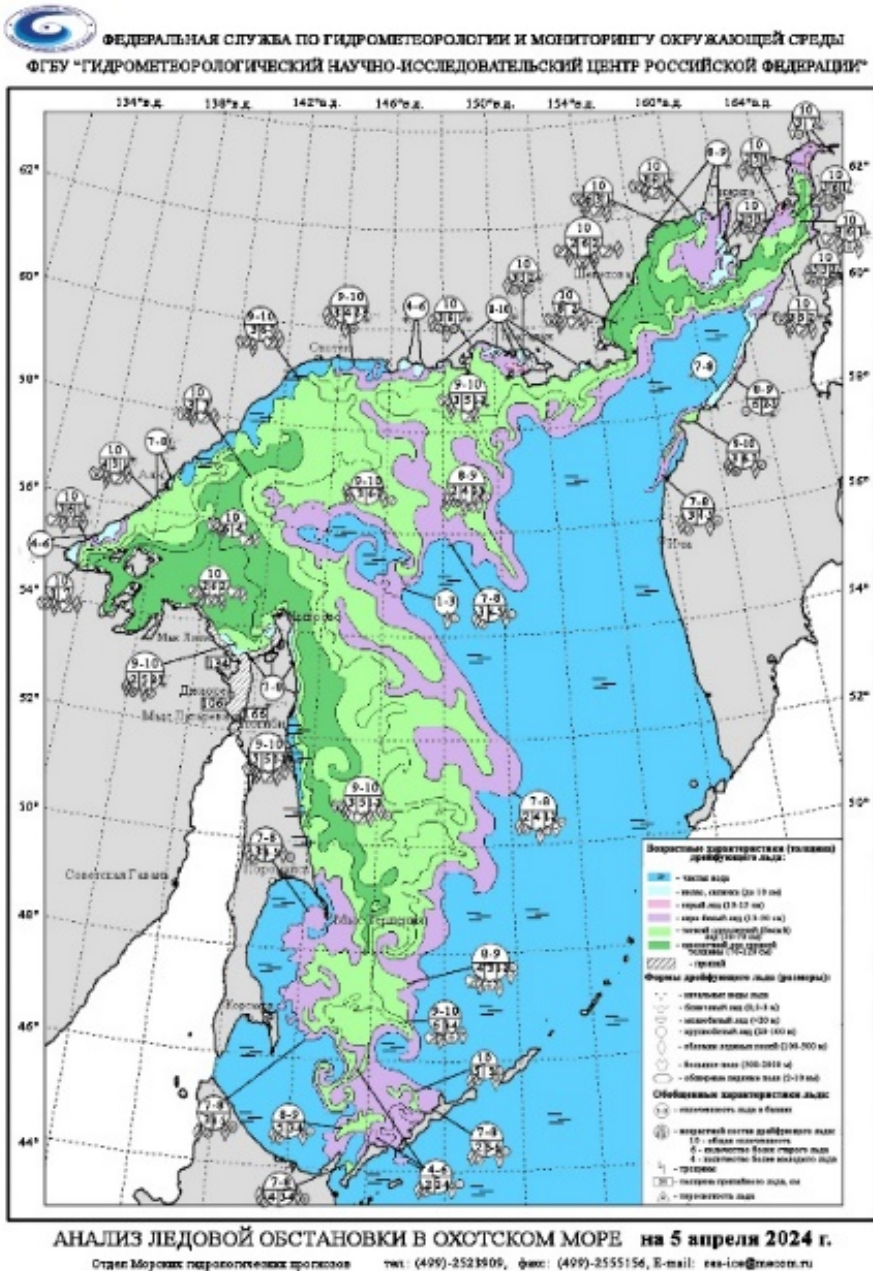


Рис. 3. Распределение ледяного покрова в северо-западной части Охотского моря 05.04.2024.

Fig.3. Ice cover distribution in the northwestern part of the Sea of Okhotsk 05.04.2024.

Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что основные особенности распределения толщины льда в регионе были спрогнозированы успешно. Согласно рис. 2, толщина льда в районе станции Аян ожидалась в диапазоне 120–150 см. Фактическая толщина льда в первой декаде апреля 2024 г. по измерениям составила 142 см. Толщина льда в районе станции Большой Шантар ожидалась в диапазоне 70–120 см. Фактическая толщина льда в первой декаде апреля 2024 г. по измерениям составила 92 см.

Заключение

На основе численных экспериментов с моделью CICE показано, что использование ледовой модели CICE с атмосферным форсингом на основе прогностических полей негидростатической модели погоды WRF-ARW позволяет удовлетворительно воспроизводить процессы нарастания и таяния льда в прибрежных районах Карского и Охотского морей, соленость которых в результате речного стока существенно меньше, чем в центральных акваториях.

Сравнение результатов прогноза ледовых характеристик, рассчитанных на основе адаптированных к физико-географическим условиям России программных продуктах CICE и WRF-ARW, с данными инструментальных измерений показало следующее.

Обская губа:

– рассчитанная толщина льда в 2021–2024 гг. в пункте Новый Порт (центральная часть Обской губы) в случае значительной толщины льда в феврале–апреле (117–163 см) во все сезоны оказалась меньше фактической на 15–20 %;

– по расчетам на май 2022 г. толщина льда на станции Новый Порт составила 160 см, а на станции Тамбей – 195 см, то есть на 35 см больше, что подтверждает увеличение толщины льда в Обской губе с юга на север;

– спрогнозировано более интенсивное нарастание льда на станции Новый Порт в декабре–январе 2022/2023 гг., чем в эти же месяцы в 2021/2022 и 2023/2024 гг, в которые наблюдалось большее значение среднемесячной толщины снежного покрова (16 и 18 см соответственно), чем в 2022/2023 гг. (10 см).

Северо-западная часть Охотского моря:

– основные особенности распределения толщины льда в апреле 2024 г. были спрогнозированы успешно;

– толщина льда в районе станции Аян в начале апреля 2024 г. ожидалась в диапазоне 120–150 см. Фактическая толщина льда в первой декаде апреля 2024 г. по измерениям составила 142 см;

– толщина льда в районе станции Большой Шантар ожидалась в диапазоне 70–120 см. Фактическая толщина льда в первой декаде апреля 2024 г. по измерениям составила 92 см.

Вычислительные алгоритмы численных прогнозов, как правило, оптимизированы для среднего диапазона расчетных величин, а корректировка и формулировка прогностических характеристик обычно выполняется на этапе постпроцессинга. В общем случае прогноз толщины льда в прибрежной зоне связан с необходимостью прогноза ряда дополнительных характеристик: даты начала формирования ледяного покрова, средней толщины льда, границы распространения ледяного покрова, даты полного очищения моря ото льда, расчет которых выполняется при малых значениях толщины льда.

Отклонение прогнозируемой толщины льда в локальной области от измеренной в 15–20 % укладывается в границы пространственной изменчивости морского льда и при оперативной работе корректируется на основании информации ледовых карт.

Авторы выражают признательность А.В. Федоренко за представление данных наблюдений за ледовыми характеристиками Карского и Охотского морей.

Список литературы

1. Андреев О.М. и др. Оценки некоторых физико-механических характеристик льда Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69, № 1. С. 44-57.
2. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, лтд, 2010. С. 94-135. https://method.meteorf.ru/publ/books/80_years/velt_zh.pdf
3. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 30-44.
4. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 7. Карское море. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 95с.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9. Охотское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1998. 342 с.
6. Дианский Н.А. и др. Оценка влияния подходного канала к порту Сабетта на изменение гидрологических условий Обской губы с помощью численного моделирования // Арктика: экология и экономика. 2015. Т. 3, № 19. С. 18.
7. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
8. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
9. Ильин Г.В. Гидрологический режим Обской губы как новой области морского природопользования в российской Арктике // Наука Юга России. 2018. Т. 14, № 2. С. 20-32.
10. Клячкин С.В., Гудкович З.М., Гузенко Р.Б., Май Р.И. Численная модель прогноза распределения льдов в юго-западной части Охотского моря заблаговременностью 1–5 суток // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 353. С. 63-87.
11. Минервин И.Г., Романюк В.М., Пищальник П.А. и др. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей // Вестник Российской академии наук. 2015. Т. 85, № 3. С. 209-217.

12. *Нестеров Е.С., Жупанов В.Д., Федоренко А.В.* Моделирование ледяного покрова Северного Каспия в экстремальные сезоны // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 11. С. 89-100.
13. *Пищальник В. М., Романюк В. А., Минервин И. Г., Батухтина А. С.* Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // *Известия ТИНРО*. 2016. Т. 185. С. 228-239.
14. *Плотников В.В.* Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. Владивосток: Дальнаука, 2002. 172 с.
15. *Тарасенко А.Д. и др.* Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007–2017 гг. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022. Т. 68, № 1. С. 48-63.
16. *Фомин В.В., Дианский Н.А., Чумаков М.М., Степанов Д.В.* Ретроспективные расчеты циркуляции и ледяного покрова Охотского моря на основе современных технологий численного моделирования // *Вести газовой науки*. 2017. №. 4 (32). С. 82-93.
17. *Чанцев В. Ю., Данышина А. В.* Расчет внутригодовой динамики гидрофизического режима Обской губы с высоким пространственным разрешением // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 12, № 3. С. 55-64.
18. *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. P. 174-184.
19. *CICE Documentation 2021*. <https://github.com/CICE-Consortium/>
20. *Hunke E.C.* Viscous–Plastic Sea Ice Dynamics with the EVP Model: Linearization Issues // *Journal of Computational Physics*. 2001. Vol. 170. P. 18-38. DOI: 10.1006/jcph.2001.6710.
21. *Roberts A.F., Hunke E.C., Allard R., Bailey D.A. et al.* Quality control for community-based sea-ice model development // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2018. Vol. 376. P. 20170344. DOI: [org/10.1098/rsta.2017.0344](https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0344).
22. *Ross J.M.* Explicit Generation of Orthogonal Grids for Ocean Models // *J. Computational Physics*. 1996. Vol. 126. P. 251-273.
23. *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](https://doi.org/10.1002/qj.2555).
24. *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.
25. *THE COMMUNITY Noah LAND-SURFACE MODEL (LSM). User’s Guide Public Release Version 2.7.1.* 26 p.
26. *WRF-ARW version 4 Modeling System User’s Guide*, April 2019. 214 p. <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>

References

1. *Andreev O.M., Golovin N.V., Krupina N.A., Kubyshkin N.V., Skutin A.A., Chernov A.V.* Estimates of certain physical and mechanical characteristics of ice in the Ob’ Bay. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2023, vol. 69, no. 1, pp. 44-57. DOI: [10.30758/0555-2648-2023-69-1-44-57](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-44-57) [in Russ.].
2. *Vel’tishchev N.F., Zhupanov V.D.* Chislennyye prognozy pogody po negidrostaticheskim modelyam obshchego pol’zovaniya WRF-ARW i WRF-NMM. *80 let Gidrometcentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 94-135 [in Russ.].

3. Veltishchev, N.F., Zhupanov, V.D. Experiments on numerical modeling of intense convection. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, pp. 560-569. DOI: 10.3103/S1068373908090033.

4. Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoy zony morey SSSR. Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoy zony morey SSSR. T. 7. Karskoe more. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 95 p. [in Russ.].

5. Gidrometeorologiya i gidrohimiya morey. T. 9. Ohotskoe more. Vypusk 1. Gidrometeorologicheskie usloviya. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1998, 342 p. [in Russ.].

6. Diansky N.A., Fomin V.V., Gruzinov V.M., Kabatchenko I.M., Litvinenko G.I. Assessment of effect of the approach channel to the port of Sabetta to changes in hydrological conditions of the Gulf of Ob using numerical modeling. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: ecology and economy]*, 2015, vol. 19, no. 3, pp. 18-29 [in Russ.].

7. Dumanskaya I.O. Ledovye usloviya morey aziatskoy chasti Rossii. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN publ., 2017, 640 p. [in Russ.].

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

9. Ilyin G.V. Hydrological conditions of the ob bay as new area of martime wildlife management in the Russian Arctic. *Nauka Yuga Rossii [Science in the South of Russia]*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 20-32. [in Russ.].

10. Klyachkin S.V., Gudkovich Z.M., Guzenko R.B., May R.I. Numerical model of the ice cover forecast in the south-western part of the Sea of Okhotsk with 1-5 days period in advance. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 353, pp. 63-87 [in Russ.].

11. Minervin I.G., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M., Truskov P.A., Pokrashenko S.A. The Zoning of the Okhotsk and the Japanese Seas Ice Cover. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk [Herald of the Russian Academy of Sciences]*, 2015, vol. 85, no. 3, pp. 209-217 [in Russ.].

12. Nesterov E.S., Zhupanov V.D., Fedorenko A.V. Modeling the Northern Caspian Sea Ice Cover in Extreme Seasons. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, pp. 995-1004. DOI: 10.3103/S1068373923110079.

13. Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batuhtina A.S. Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015. *Izvestiya TINRO*, 2016, vol. 185, no. 2, pp. 228-239. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-185-228-239 [in Russ.].

14. Plotnikov V.V. Izmenchivost' ledovyh usloviy dal'nevostochnyh morey Rossii i ih prognoz. Vladivostok, Dal'nauka publ., 2002, 172 p. [in Russ.].

15. Tarasenko A.D., Selyuzhenok V.V., Sandalyuk N.V., Abramova I.A., Demchev D.M. A study of sea ice regime in the Obskaya guba Bay using modern satellite data in 2007–2017. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2022, vol. 68, no. 1, pp. 48-63. DOI: 10.30758/0555-2648-2021-68-1-48-63 [in Russ.].

16. Dianskiy N.A., Fomin V.V., Chumakov M.M., Stepanov D.V. Application of modern numerical ocean and ice models for retrospective simulations of circulation and ice cover of Okhotsk Sea. *Vesti gazovoy nauki*, 2017, vol. 32, no. 4, pp. 82-93 [in Russ.].

17. Chantsev V.Yu., Danshina A.V. A calculation of the intra-annual dynamics of the Ob Bay hydrophysical regime with high spatial resolution. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika [Fundamental and Applied Hydrophysics]*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 55-64. DOI: 10.7868/S2073667319030079 [in Russ.].

18. 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.
19. CICE Documentation 2021. <https://github.com/CICE-Consortium>.
20. Hunke E.C. Viscous–Plastic Sea Ice Dynamics with the EVP Model: Linearization Issues. *Journal of Computational Physics*, 2001, vol. 170, pp. 18-38. DOI: 10.1006/jcph.2001.6710.
21. Roberts A.F., Hunke E.C., Allard R., Bailey D.A. et al. Quality control for community-based sea-ice model development. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2018, vol. 376, pp. 20170344. DOI: org/10.1098/rsta.2017.034.
22. Ross J.M. Explicit Generation of Orthogonal Grids for Ocean Models. *J. Computational Physics*, 1996, vol. 126, pp. 251-273.
23. 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.
24. 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.
25. THE COMMUNITY Noah LAND-SURFACE MODEL (LSM). User’s Guide Public Release Version 2.7.1., 26 p.
26. WRF-ARW version 4 Modeling System User’s Guide, April 2019. 214 p. Available at: www.mmm.ucar.edu/wrf/users

Поступила 24.06.2024; одобрена после рецензирования 24.09.2024;

принята в печать 15.10.2024.

Submitted 24.06.2024; approved after reviewing 24.09.2024;

accepted for publicat on 15.10.2024