

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-92-100>

УДК 551.467

**Оценка качества
численного прогноза толщины льда
для Каспийского и Охотского морей
в зимний сезон 2023/2024 гг.**

***Е.С. Нестеров¹, В.Д. Жупанов¹,
А.А. Максимов², А.В. Федоренко¹***

¹*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

²*Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии
«Планета», г. Москва, Россия
nesterov@mecom.ru*

Прогноз толщины льда на 16 суток для Каспийского и Охотского морей реализован на основе вязко-пластичной модели льда CICE с использованием в качестве форсинга трехчасовых прогностических полей негидростатической атмосферной модели WRF-ARW: приземной температуры, влажности, скорости ветра, осадков и входящей солнечной радиации. Прогноз рассчитывается в узлах регулярной широтно-долготной сетки 0.25°. Выполнено сравнение значений толщины льда на 7 и 14-й день прогноза с измеренной толщиной на морских береговых станциях Большой Пешной в Каспийском море и на пяти станциях в Охотском море, а также с данными анализа GDAS NCEP, карт Sigrid-3 ФГБУ «НИЦ «Планета» и карт ледовой обстановки ФГБУ «Гидрометцентр России» по всему Охотскому морю. Сравнение результатов расчета с данными наблюдений показало, что модель удовлетворительно воспроизводит процессы нарастания и таяния льда.

Ключевые слова: Каспийское море, Охотское море, модель CICE, толщина льда

**Verification of numerical forecasts
of sea ice thickness for the Caspian Sea
and the Sea of Okhotsk
in the 2023/2024 winter**

***E.S. Nesterov¹, V.D. Zhupanov¹,
A.A. Maksimov², A.V. Fedorenko¹***

¹*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

²*Scientific research center of space hydrometeorology
«Planeta», г. Москва, Россия
nesterov@mecom.ru*

The 16-day forecast of sea ice thickness for the Caspian Sea and the Sea of Okhotsk was implemented on the basis of the CICE viscoplastic sea ice model using three-hour forecast fields of surface temperature, humidity, wind speed, precipitation, and incoming solar radiation from the WRF-ARW nonhydrostatic atmosphere model as forcing. The forecast is computed at the points of the 0.25° regular latitude-longitude grid. The values of sea ice

thickness on the 7th and 14th forecast days were compared with the measured sea ice thickness from the Bol'shoi Peshnoi marine coastal station in the Caspian Sea and five stations in the Sea of Okhotsk, as well as with the data of the GDAS analysis (NCEP), Sigrid-3 maps (RSC Planeta), and sea ice maps (Hydrometcentre of Russia) for the entire Sea of Okhotsk. The comparison of the simulation results with observational data showed that the model satisfactorily reproduces the growth and melting of sea ice.

Keywords: Caspian Sea, Sea of Okhotsk, CICE model, sea ice thickness

1. Метод прогноза толщины льда

Прогнозы характеристик ледяного покрова могут основываться на статистических или гидродинамических моделях [8]. В данной статье приводятся оценки качества численного прогноза толщины льда для Каспийского и Охотского морей, реализованного на основе вязко-пластичной модели льда CICE [11] с использованием в качестве форсинга прогностических полей негидростатической атмосферной модели WRF-ARW [1, 16]. Опыт использования CICE в различных прогностических центрах описан в [6]. На основе имеющегося у авторов опыта моделирования и прогнозирования ледяного покрова [3, 5, 6, 14] разработан метод прогноза на 16 суток одной из основных характеристик ледяного покрова – его толщины.

Основные характеристики метода:

– атмосферный форсинг (3-часовые данные о приземной температуре воздуха, его влажности, скорости ветра, скорости выпадения осадков, проходящей солнечной радиации) задается на основе метеорологического прогноза, рассчитываемого с использованием программного пакета модели WRF-ARW.v4.3 [1, 16];

– прогноз толщины льда для морской акватории вычисляется в узлах регулярной широтно-долготной сетки 0.25° как сумма значения толщины в анализе GDAS (Global Data Assimilation System) NCEP и приращения на период заблаговременности прогноза, рассчитанного по модели CICE;

– для оценки успешности прогноза используются наблюдения ледовых характеристик на морских гидрометеорологических станциях, характеристики льда по данным GDAS NCEP, информация цифровых карт Sigrid-3 ФГБУ «НИЦ «Планета» и карты ледовой обстановки ФБГУ «Гидрометцентр России».

Ранее были выполнены расчеты ледовых характеристик Каспийского моря для зимних сезонов 2005–2009 гг., а также для экстремальных сезонов 2011/2012 и 2015/2016 гг. [5, 14]. Ледовые условия зимы 2011/2012 гг. на Северном Каспии были заметно тяжелее ледовых условий зимы 2015/2016 гг. как по ледовитости, так и по толщине льда. По расчетам, замерзание моря в экстремально холодный сезон 2011/2012 гг. произошло почти на месяц раньше, чем в экстремально теплый сезон 2015/2016 гг., а очищение – на полмесяца позже. Это близко к фактическим датам: замерзание в 2011/2012 гг. произошло на 37 дней раньше, чем в 2015/2016 гг., а очищение – на 30 дней позже.

Также были выполнены расчеты ледовых характеристик в северо-западной части Охотского моря в 2024 г. [3], результаты которых сопоставлены с наблюдениями на станциях Аян и Большой Шантар. Сравнение показало, что если на станции Аян рассчитанная толщина льда в марте-апреле оказалась меньше фактической, то на станции Большой Шантар – больше фактической.

В [4] описан опыт использования численной модели, разработанной в ФГБУ «ААНИИ», для прогноза на 5 суток распределения льда в юго-западной части Охотского моря. Оценка достоверности прогнозов выполнялась по сплоченности льда. Получено, что оправдываемость прогнозов сплоченности составила 87 %. В [2] на основе модели SICE прогнозировалась на 5–10 суток ледовая обстановка в Беринговом море. Опыт использования SICE в различных прогностических центрах описан в [6].

2. Сравнение ледовых полей GDAS NCEP и карт ФГБУ «Гидрометцентр России»

Значения толщины льда в системе GDAS NCEP основаны на информации радарной альтиметрии спутников ICESat-2 и CryoSat-2 [12, 13, 15], причем доступна информация о пяти категориях толщины льда, используемых в модели SICE. Спутниковые данные также включают высоту снежного покрова, который влияет на изменчивость толщины льда.

В отделе морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» регулярно строятся карты ледового покрова неарктических морей России с использованием спутниковой информации и данных наблюдений на морских гидрометеорологических станциях. Пример ледовых полей GDAS NCEP и карт ФГБУ «Гидрометцентр России» представлен на рис. 1.

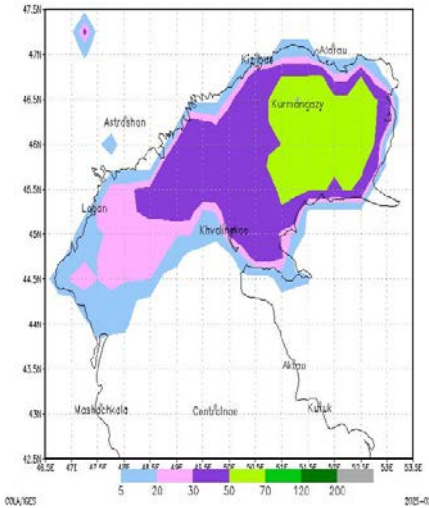
Из сравнения полей видно, что на обоих картах в северо-восточной части моря есть обширные области схожей конфигурации с максимальной толщиной льда 50–70 см (а) и 30–70 см (б). Аналогичное сравнение для Охотского моря представлено на рис. 2.

На обоих картах в западной части моря в районе Шантарских островов есть область льда толщиной 70–120 см.

Приведенные примеры свидетельствуют, что области максимальной толщины льда в Каспийском и Охотском морях в обоих источниках близки как по конфигурации, так и по значениям толщины. Также подобны закономерности изменения толщины льда от максимальных значений в западной части моря к уменьшению толщины по направлению к области чистой воды.

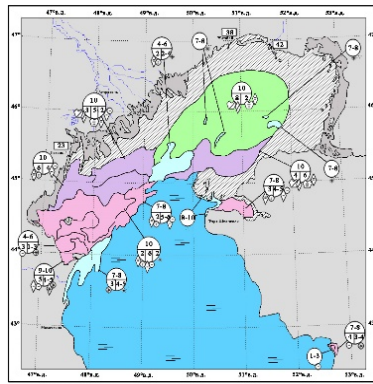
Приведем наибольшие из наблюдаемых значений толщины льда на станции Большой Пешной в Каспийском море и Большой Шантар в Охотском море. В экстремально холодный зимний сезон 2011/2012 гг. максимальная толщина льда на станции Большой Пешной составляла 50 см [5]. В суровые зимы толщина льда в районе станции Большой Шантар может достигать 130–150 см [3].

Результаты GDS/NCEP Sea Ice Thickness [cm] for 20230217



а)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ «ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»



Анализ ледовой обстановки на Каспийском море на 14 февраля 2023 г.

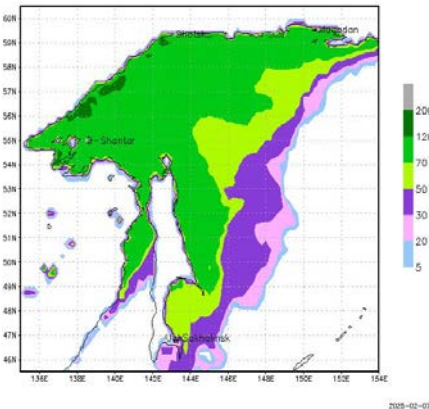


б)

Рис. 1. Толщина льда в Каспийском море 17.02.2023 г. по данным GDAS NCEP (а) и 14.02.2023 г. по данным ФГБУ «Гидрометцентр России» (б).

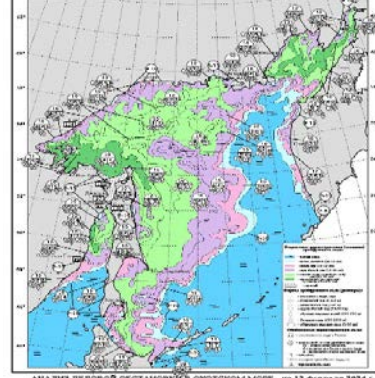
Fig. 1. Sea ice thickness in the Caspian Sea (a) on February 17, 2023 according to the NCEP GDAS data (a) and on February 14, 2024 according to the data of the Hydrometcentre of Russia.

Результаты GDS/NCEP Sea Ice Thickness [cm] for 20240210



а)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ «ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»



Анализ ледовой обстановки в Охотском море на 12 февраля 2024 г.



б)

Рис. 2. Толщина льда в Охотском море 10.02.2024 г. по данным GDAS NCEP (а) и 12.02.2024 по данным ФГБУ «Гидрометцентр России» (б).

Fig. 2. Sea ice thickness in the Sea of Okhotsk (a) on February 10, 2024 according to the NCEP GDAS data and (b) on February 12, 2024 according to the data of the Hydrometcentre of Russia.

3. Оценки оправдываемости прогнозов толщины льда Каспийского и Охотского морей

Для количественной оценки прогнозов в качестве фактических данных использовались значения толщины льда в узлах расчетной сетки по информации ледовых карт в формате SIGRID-3 [10] и полей анализов GDAS NCEP [13, 15].

Качество прогноза ледовых условий оценивалось по расчету оправдываемости. Согласно РД 52.27.759-2011 [7], оправдываемость долгосрочных прогнозов (15 суток – 6 месяцев) должна составлять 70–75 % при ошибке прогноза толщины льда, равной 30 % от фактического ее изменения за период заблаговременности прогноза.

По аналогии с методикой оценки качества долгосрочных ледовых прогнозов для обеспечения морских операций в морях российской Арктики [9], оправдываемость численного прогноза толщины льда определяется как осредненное для рассматриваемого числа прогнозов отношение количества узлов расчетной сетки, разность прогностического и фактического значений в которых меньше пороговой величины ошибки текущего прогноза, равной значению $0,8\sigma$ для поля фактической толщины льда для текущей даты прогноза, к общему числу узлов расчетной сетки, где σ – средняя пространственная изменчивость поля толщины льда по данным анализов GDAS NCEP на дату прогноза. В табл. 1 приведены оценки – абсолютная (ABS), средняя арифметическая (MDL), среднеквадратичная (RSME) ошибки сравнения данных анализа толщины льда по информации GDAS NCEP и SIGRID-3 ФГБУ «НИЦ «Планета» с измерениями толщины припая морскими береговыми станциями в Охотском море в зимний сезон 2023/2024 годов.

Таблица 1. Сравнение толщины льда в Охотском море по данным анализов GDAS NCEP с данными береговых станций в зимний сезон 2023/2024 гг.

Table 1. The comparison of sea ice thickness in the Sea of Okhotsk according to the NCEP GDAS data with the data of coastal stations in the 2023/2024 winter

Береговая станция	Макс. толщина, см	Ошибки (анализ – станция), см					
		GDAS NCEP			Sigrid-3*		
		ABS	MDL	RMSE	ABS	MDL	RMSE
Шантар	92	6	6	7	13	8	17
Аян	146	14	-12	16	29	-29	32
Погиби	170	24	-8	26	18	-18	21
Джаоре	119	15	-13	18	13	-1	16
Байдуков	134	8	-2	10	7	7	10
Охотское море	170	13.4	-5.8	15.4	16	-6.6	19.2

Примечание. *Сравнение с данными SIGRID-3 НИЦ «Планета» выполнено при условии, что толщина припая, измеренная морскими береговыми станциями, менее 100 см.

В табл. 2 приведены оценки качества прогнозов толщины льда заблаговременностью 7 и 14 суток для зимнего сезона 2023/2024 гг. в сравнении с измеренной толщиной на морских береговых станциях и по всему морю на основе информации ледовых карт в формате SIGRID-3.

Таблица 2 Качество прогнозов толщины льда для Каспийского и Охотского морей в зимний сезон 2023/2024 гг. при допустимой ошибке 0.67σ

Table 2. The skill of sea ice thickness forecasts for the Caspian Sea and the Sea of Okhotsk in the 2023/2024 winter with an acceptable error of 0.67σ

Береговая станция	FCT* %	Ошибки (прогноз – станция), см					
		ABS		MDL		RMSE	
		7 дней	14 дней	7 дней	14 дней	7 дней	14 дней
Пешной	77	7	7	7	6	7	4
Шантар	81	6	4	6	4	8	5
Аян	79	16	21	-14	-21	18	22
Погиби	76	25	25	-9	-17	28	28
Джаоре	62	16	19	-14	-19	19	22
Байдуков	80	8	9	-1	-6	10	11
Каспийское море	73	7	7	7	6	7	4
Охотское море	75.6	14.2	15.6	-6.4	-11.8	16.6	17.6

Примечание. * При допустимой ошибке 0.8σ оправдываемость прогнозов в Охотском море равна 79.8 %.

В таблицах FCT – оправдываемость прогноза; ABS, MDL, RSME – абсолютная, средняя арифметическая и среднеквадратичная ошибки соответственно. Оправдываемость равна 100 % при значении ошибки прогноза менее 0.67σ значения изменчивости поля анализов толщины льда GDAS NCEP и равна нулю в противном случае. Допустимая ошибка равна 0.67σ для краткосрочных прогнозов и 0.8σ для долгосрочных [7].

Качество прогнозов толщины льда по станции Большой Пешной в Каспийском море почти не зависит от заблаговременности. Наименьшие ошибки прогнозов в Охотском море характерны для станции Большой Шантар, а наибольшие – для станции Погиби. Частично это связано с тем, что станция Большой Шантар находится на острове в открытом море, а станция Погиби – у береговой линии в Татарском проливе.

Заключение

Прогноз толщины льда для Каспийского и Охотского морей реализован на основе вязко-пластичной модели льда CICE с использованием в качестве форсинга трехчасовых прогностических полей негидростатической

атмосферной модели WRF-ARW: приземной температуры, влажности, скорости ветра, осадков и приходящей солнечной радиации. Прогноз толщины льда рассчитывается в узлах регулярной широтно-долготной сетки 0.25° как сумма ее текущего значения в поле анализов и рассчитанного по модели CICE приращения на период заблаговременности прогноза.

Сравнение ледовых полей GDAS NCEP и ледовых карт ФГБУ «Гидрометцентр России» для Каспийского и Охотского показало, что области максимальной толщины льда в обоих источниках близки как по конфигурации, так и по значениям толщины льда. Данные о толщине льда в узлах расчетной сетки уточнялись по информации ледовых карт в стандартном векторном формате SIGRID-3.

Для прогнозов в Каспийском и Охотском морях в зимний сезон 2023/2024 гг. выполнено сравнение значений толщины льда на 7 и 14-й день прогноза с измеренной толщиной на морских береговых станциях Большой Пешной в Каспийском море и на пяти станциях в Охотском море и по всему морю на основе информации ледовых карт в формате SIGRID-3.

Качество прогнозов толщины льда по станции Большой Пешной почти не зависит от заблаговременности. В Охотском море в среднем наименьшие ошибки прогнозов характерны для станции Большой Шантар, а наибольшие для станции Погиби, что частично связано с особенностями их физико-географического положения. Оправдываемость прогнозов толщины льда по всему Охотскому морю уменьшается с увеличением заблаговременности.

Список литературы

1. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5-18.
2. Вржжик А.Н. Среднесрочный прогноз ледовой обстановки Берингова моря // Известия ТИНРО. 2020. Т. 200, вып. 1. С. 131-140.
3. Жупанов В.Д., Нестеров Е.С. Прогноз толщины ледяного покрова в прибрежных областях Карского и Охотского морей // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 3 (393). С. 90-104.
4. 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.
5. 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.
6. Нестеров Е.С., Жупанов В.Д., Федоренко А.В. Моделирование характеристик ледяного покрова Каспийского моря на основе модели CICE // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 1 (383). С. 57-70.
7. РД 52.27.759-2011 Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. 201 с.
8. РД 52.27.881-2019 Руководство по гидрометеорологическому обеспечению морской деятельности. 125 с.

9. Юлин А.В., Миронов Е.У., Шевелева Т.В., Павлова Е.А. Качество долгосрочных ледовых прогнозов для обеспечения морских операций в морях российской Арктики // Метеорология и гидрология. 2025. № 2. С. 88-99.

10. A vector archive format for sea ice charts // WMO/TD-No.1214.JCOMM Technical Report No. 24. WMO, 2004

11. CICE Documentation. 2024. <https://cice-consortium-cice.readthedocs.io/en/main/>
<https://zenodo.org/record/1205674>

12. Kacimi S., Kwok R. Arctic snow depth, ice thickness, and volume from ICESat-2 and CryoSat-2:2018–2021 // Geoph. Res. Let. 2022. DOI: 10.1029/2021GL097448

13. Landy J., Geoffrey J., Dawson G., Tsamados M. et al. A year-round satellite sea-ice thickness record from CryoSat-2 // Nature. 2022. Vol. 609. P. 517-522. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05058-5>.

14. Nesterov E.S., Zhupanov V.D., Fedorenko A.V. Modeling of the Caspian Sea ice on a seasonal scale // Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 52. WCRP Report No.4. WMO, Geneva, 2022. P. 8-05.

15. Schröder D., Feltham D., Tsamados M., Ridout A. et al. New insight from CryoSat-2 sea ice thickness for sea ice modelling // The Cryosphere. 2019. Vol. 13. P. 125-139.

16. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.1, <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user>.

References

1. Vel'tishchev, N.F., Zhupanov, V.D., Pavlyukov, Y.B. Short-range forecast of heavy precipitation and strong wind using the convection-allowing WRF models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, pp. 1-10. DOI: 10.3103/S1068373911010018.

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. Jupanov V.D., Nesterov E.S. Forecast of ice cover thickness in coastal areas of the Kara and Okhotsk seas. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 393, no. 3, pp. 90-104 [in Russ.].

4. 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.].

5. 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, no. 11, pp. 995-1004. DOI: 10.3103/S1068373923110079.

6. Nesterov E.S., Zhupanov V.D., Fedorenko A.V. Modeling the characteristics of the Caspian Sea ice cover based on the CICE model. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 383, no. 1, pp. 57-70 [in Russ.].

7. RD 52.27.759-2011 Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Chast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov. 201 p. [in Russ.].

8. RD 52.27.881-2019 Rukovodstvo po gidrometeorologicheskomu obespecheniyu morskoy deyatel'nosti. 125 p. [in Russ.].

9. Yulin A.V., Mironov E.U., Sheveleva T.V., Pavlova E.A. Quality of Long-term Ice Forecasts to Support Marine Operations in the Russian Arctic Seas. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2025, vol. 50, no. 2. [in Russ.].

10. A vector archive format for sea ice charts. WMO/TD-No.1214. JCOMM Technical Report No. 24. WMO, 2004.

11. CICE Documentation. 2024. Available at: <https://cice-consortium-cice.readthedocs.io/en/main/> <https://zenodo.org/record/1205674>.

12. Kacimi S., Kwok R. Arctic snow depth, ice thickness, and volume from ICESat-2 and CryoSat-2:2018–2021. *Geoph. Res. Let.*, 2022. DOI: 10.1029/2021GL097448.

13. Landy J., Geoffrey J., Dawson G., Tsamados M. et al. A year-round satellite sea-ice thickness record from CryoSat-2. *Nature*, 2022, vol. 609, pp. 517-522. DOI: 10.1038/s41586-022-05058-5.

14. Nesterov E.S., Zhupanov V.D., Fedorenko A.V. Modeling of the Caspian Sea ice on a seasonal scale. *Research activities in Earth system modelling*. Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 52. WCRP Report No.4, WMO, Geneva, 2022, pp. 8-05.

15. Schröder D., Feltham D., Tsamados M., Ridout A. et al. New insight from CryoSat-2 sea ice thickness for sea ice modeling. *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, pp. 125-139.

16. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.1, Available at: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user>.

*Поступила 21.05.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025;
принята в печать 15.10.2025.*

*Submitted 21.05.2025; approved after reviewing 01.10.2025;
accepted for publication 15.10.2025.*