

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-4-6-38>

УДК 551.509+551.468

**Верификация сезонных прогнозов
температуры поверхности океана
и ледовых характеристик
на основе модели Земной системы ИВМ РАН**

**Ю.Д. Реснянский¹, А.А. Зеленко¹, В.Н. Степанов¹,
Б.С. Струков¹, В.М. Хан^{1,2}, Е.М. Володин^{2,1}, А.С. Грицун²,
М.А. Тарасевич^{2,1}, В.В. Брагина^{2,1}**

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

²*Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН,
г. Москва, Россия
resny@mail.ru*

Оценена успешность сезонных прогнозов температуры поверхности океана (ТПО) и характеристик морских льдов. Оценки качества прогнозов рассчитаны для двух версий модели Земной системы ИВМ РАН: INM-CM5 и INM-CM6, различающихся горизонтальным разрешением атмосферного и аэрозольного блоков и некоторыми параметризациями физических процессов: облачности, непрямого эффекта аэрозолей, эволюции снежного покрова.

Показано, что оценки качества прогнозов ТПО и ледовых характеристик по версии INM-CM6 в большинстве случаев оказываются выше, чем по INM-CM5. Полученные оценки сопоставимы с оценками прогнозов зарубежных центров, подтверждая соответствие построенной на модели ИВМ прогностической системы мировому уровню успешности сезонных прогнозов.

Ключевые слова: модель Земной системы, температура поверхности океана, морской лед, сезонные прогнозы, верификация

**Verification of seasonal forecasts of
sea surface temperature
and sea ice characteristics based
on the INM RAS Earth system model**

**Yu.D. Resnyanskiy¹, A.A. Zelenko¹, V.N. Stepanov¹,
B.S. Strukov¹, V.M. Khan^{1,2}, E.M. Volodin^{2,1}, A.S. Gritsun²,
M.A. Tarasevich^{2,1}, V.V. Bragina^{2,1}**

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

²*Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia
resny@mail.ru*

The accuracy of seasonal forecasts of sea surface temperature (SST) and sea ice characteristics is assessed. Forecast skill scores are calculated for two versions of the INM RAS Earth system model (INM-CM5 and INM-CM6) differing in the horizontal resolution of the atmospheric and aerosol modules and in some parameterizations of physical processes: cloudiness, indirect aerosol effects, snow cover evolution.

It is shown that in most cases the skill scores of SST and ice characteristics forecasts based on the INM-CM6 version are higher than those for the INM-CM5. The scores are comparable with those in foreign centers, confirming the compliance of the forecasting system based on the INM RAS model with the world level of accuracy of seasonal forecasts.

Keywords: Earth system model, sea surface temperature, sea ice, seasonal forecasts, verification

Введение

Океан, наряду с атмосферой, является важнейшим звеном климатической системы, изменчивость которой обусловлена как собственной динамикой этих двух сред, так и процессами их взаимодействия. Причем роль океана вследствие его существенно большей, чем у атмосферы, тепловой инерции возрастает по мере увеличения временных масштабов, в том числе и на масштабах сезонных прогнозов. Описание механизмов формирования такой изменчивости является основополагающим для совершенствования методов долгосрочных гидрометеорологических прогнозов, понимания причин наблюдаемых изменений климата, для оценки его возможных изменений в будущем и принятия решений о введении ограничений на промышленную деятельность, оказывающую воздействие на состояние климатической системы.

Температура поверхности океана (ТПО) и характеристики морского льда относятся к числу наиболее важных параметров состояния климатической системы. От успешности воспроизведения глобальных полей ТПО и ледового покрова в совместных моделях атмосферы и океана в значительной степени зависит точность прогнозов всех параметров состояния климатической системы. Поэтому в практику климатических центров, выпускающих регулярную прогностическую продукцию, входят задачи верификации прогнозов ТПО и морского льда, получаемых в рамках совместных моделей Земной системы.

Такие оценки качества прогнозов, координируемые ВМО [13], проводятся в первую очередь на данных многолетних ретроспективных прогнозов, охватывающих период, близкий к периоду обновления климатических норм. Помимо этого, для поддержания и развития прогностических систем необходим регулярный мониторинг точности текущих прогнозов, оцениваемых по мере поступления фактических данных наблюдений для соответствующего прогностического интервала.

В данной статье описывается метод сезонных прогнозов на основе модели Земной системы ИВМ РАН и системы подготовки данных Гидрометцентра России, разработанный в рамках реализации Важнейшего

инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ), и представляются результаты верификация ретроспективных и квазиоперативных прогнозов ТПО и морских льдов, выпускаемых прогностической системой на базе двух версий модели: INM-CM5 и INM-CM6.

Прогностическая технология

Прогностическая технология, обеспечивающая составление сезонных прогнозов, построена на базе глобальной модели Земной системы ИВМ РАН [14, 15], участвующей в международном проекте по сравнению моделей CMIP6 [8], и системы генерации ансамбля начальных состояний [16]. Ансамбль начальных состояний, формируемый из 10–30 членов, получается путем внесения случайного гладкого длинноволнового возмущения с амплитудой 0,1 К в температуру воздуха на всех уровнях атмосферного блока модели в каждой точке модельной сетки.

Объектом прогнозирования служит обширный комплекс метеорологических и океанографических переменных, прогнозируемых на сроки до 6–9 месяцев.

Основными блоками модели являются: блок динамики атмосферы, включающий воспроизведение процессов в верхнем слое почвы, аэрозольный блок, блок динамики океана и блок динамики и термодинамики морского льда. В настоящее время для прогностических приложений используются две версии модели Земной системы ИВМ РАН: INM-CM5 и INM-CM6. В версии INM-CM5 горизонтальное разрешение модели в атмосферном и аэрозольном блоках составляет $2^{\circ} \times 1,5^{\circ}$ по долготе и широте с 73 сигма-уровнями по вертикали до высоты около 60 км, а в океанском блоке – $0,5^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ по долготе и широте с 40 сигма-уровнями. Для сезонных прогнозов в этой версии начальные состояния атмосферы, океана и суши задаются в виде аномалий "климатология модели + аномалия реанализа или текущего анализа на момент старта прогноза".

В версии INM-CM6 горизонтальное разрешение модели в атмосферном блоке повышено до $1,25^{\circ} \times 1^{\circ}$ с сохранением 73 сигма-уровней и модификацией некоторых параметризаций (облачности, непрямого эффекта аэрозолей, эволюции снежного покрова). Параметры сеточной области океанского и ледового блоков не претерпели изменений в сравнении с INM-CM5. Начальное состояние в INM-CM6 задается в виде полных полей для атмосферы, океана и морского льда и в виде аномалий для почвы и поверхностных характеристик. Размер ансамбля составляет 10 реализаций в ретроспективных расчетах (1991–2020 гг.) и 30 реализаций в квазиоперативных прогнозах (2022–2024 гг.).

Исходными для определения начальных состояний являются данные реанализа ERA5 [9] для атмосферы и деятельного слоя суши, а также данные SODA3.4.2 [5] (ретроспективные прогнозы) и Системы усвоения

океанографических данных (СУОД) Гидрометцентра России [1–3] (квазиоперативные прогнозы) для океана и морского льда. Усваиваемыми данными в СУОД Гидрометцентра России являются вертикальные распределения температуры и солёности воды $T(z)$ и $S(z)$, измеряемые профилирующими буями Арго, а также сеточные данные анализов ТПО (по спутниковым и контактными измерениям) и сплоченности морского льда (спутниковые данные).

Ежедневная выходная продукция СУОД в формате NetCDF размещается на дисковых массивах ЭВМ CRAY, а также в форме ежедневно обновляемого архива на общедоступном ftp-сервере. Эти данные являются исходными для определения начальных условий в океанском и ледовом блоках модели Земной системы ИВМ РАН, используемой при составлении квазиоперативных прогнозов.

Прогностическая технология составления сезонных прогнозов обеспечивает возможность расчета сезонных прогнозов на вычислительном комплексе ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» Cray XC40-LC для двух разновидностей прогнозов: ретроспективных и квазиоперативных. В обоих случаях реализуется ансамблевый подход. Расчет ансамбля прогнозов осуществляется в несколько этапов, выполняемых последовательно: создание набора начальных состояний для модели Земной системы ИВМ РАН на требуемую начальную дату, запуск ансамбля прогностических расчетов, подготовка их результатов для последующей обработки и использования в прогностической практике Гидрометцентра России.

Испытания метода

Результаты оценки качества прогнозов метеорологических переменных (давление на уровне моря, высота геопотенциала H500, температура воздуха на уровне 850 гПа и у земной поверхности, атмосферные осадки) по модели Земной системы ИВМ РАН в версии INM-CM5 были представлены на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета 22.11.2023. На основе этого представления принято решение о внедрении в прогностическую работу ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра «Системы сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5» наряду с использованием ранее внедренных отечественных технологий глобальных сезонных прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» и ФГБУ «ГГО» [4].

В число прогностических переменных, сезонные прогнозы которых рассматривались ЦМКП в ноябре 2023 г., не вошли океанографические переменные. Целью представляемых здесь работ является оценка качества сезонных (на сроки до 6–9 месяцев) ретроспективных и квазиоперативных прогнозов океанографических переменных (ТПО, характеристики морских

льдов) с использованием двух версий модели Земной системы INM-CM5 и INM-CM6.

В соответствии с Программой испытаний рассматриваемого метода, утвержденной директором ФГБУ «Гидрометцентр России» 08.02.2022, оценивались показатели качества ретроспективных прогнозов по модели INM-CM5 за период 1991–2019 гг. и составленных в квазиоперативном режиме прогнозов за период 2021–2023 гг. В качестве объекта прогнозирования рассматривались среднемесячные аномалии ТПО и характеристик морского льда на сроки до 6–9 месяцев. В дополнение к задачам, указанным в Программе испытаний от 08.02.2022, оценивались также прогнозы по обновленной версии модели INM-CM6 (прогнозы на сроки до 4 месяцев) и проводилось сопоставление оценок по этим двум версиям.

Расчеты показателей точности выполнялись для прогнозов океанологических параметров (ТПО, сплоченность и толщина морского льда) из архива прогностической системы, включающих:

- ретроспективные ансамблевые 6-месячные прогнозы (англ. hindcasts), полученные на базе модели INM-CM5 за период 1991–2019 гг. для восьми стартовых месяцев – с января по май и с сентября по декабрь для каждого года указанного интервала;

- ретроспективные ансамблевые 4-месячные прогнозы, полученные на базе модели INM-CM6 за период 1991–2020 гг., стартующие каждый календарный месяц указанного интервала лет;

- квазиоперативные ансамблевые 6-месячные прогнозы, полученные на базе модели INM-CM5 для нескольких стартовых месяцев 2021–2023 гг.;

- квазиоперативные ансамблевые 4-месячные прогнозы, полученные на базе модели INM-CM6 для стартовых месяцев с января 2022 г. по февраль 2024 года.

Следует иметь в виду, что как для ретроспективных, так и для квазиоперативных прогнозов на разных этапах использовались два варианта начальной даты прогностического интегрирования модели: первое число стартового месяца прогноза (StartMon) или 22-е число предшествующего месяца. Поэтому при рассмотрении результатов оценок и в соответствующих таблицах прогнозы маркируются указателем Day0 на стартовую дату прогнозов.

Для оценки качества воспроизведения совместной моделью гидрофизических полей и успешности получаемых с помощью этой модели прогнозов использовались следующие контрольные данные.

Данные по температуре поверхности океана NOAA OI SST v2.1 (NOAA High-resolution Blended Analysis of Daily SST and Ice. Data on

a 1/4° global grid). Подготовлены в NOAA (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>). Представляют собой результаты объективного анализа ТПО с использованием данных судовых и буйковых наблюдений и измерений Арго [10]. Имеются среднемесячные поля с сентября 1981 г. по настоящее время на сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Данные по сплоченности морских льдов NSIDC. Подготовлены в Национальном центре данных США по снегу и льду (NSIDC – National Snow and Ice Data Center, <https://nsidc.org/home>) путем обработки микроволновых спутниковых измерений SSM/I для северных и южных полярных регионов [6]. Представлены для обеих полярных областей на стереографических сетках с шагом 25 км за период с 1978 г. по настоящее время.

Данные по толщине и сплоченности морских льдов PIOMAS/GIOMAS (Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System / Global Ice-Ocean Modeling and Assimilation System) в северном и южном полушариях (<https://psc.apl.uw.edu/data/global-sea-ice-giomas-data-sets/>; <https://psc.apl.uw.edu/research/projects/arctic-sea-ice-volume-anomaly/>). Подготовлены в Polar Science Center (PSC), University of Washington [12, 17]. В этой системе в число усваиваемых включались данные NSIDC по сплоченности льда за период с 1979 г. по настоящее время.

Основная часть выполненных оценок относится к детерминированным прогнозам, определяемым как среднее по прогностическому ансамблю. Успешность этих прогнозов в значительной степени определяет и качество вероятностных прогнозов.

Верификация прогнозов выполнялась не для собственно оцениваемых характеристик, а в терминах их аномалий – отклонений от соответствующих (модельных и контрольных) норм. Прогностические аномалии рассчитывались в отклонениях от модельного климата, получаемого осреднением ретроспективных прогнозов соответствующих величин.

Площадь ледяного покрова (sea ice area) по выбранной области определялась как сумма произведений сплоченности в каждой из ячеек сеточной области со сплоченностью не менее 0,15 на площадь этой ячейки [7]. Рассчитываемую таким образом площадь ледяного покрова не следует путать с другой часто рассматриваемой характеристикой – протяженностью ледяного покрова (sea ice extent), элементы суммы которой по ячейкам со сплоченностью более 0,15 не включают умножение на сплоченность [7]. Пороговое ограничение по сплоченности 0,15 применялось и при оценке объема льда в соответствующей приполярной географической области.

При оценке прогнозов в терминах аномалий, отсчитываемых от средних по времени норм, следует иметь в виду возможное влияние эволюции таких норм со временем вследствие наблюдающихся в настоящее время изменений климата. Поэтому оценки коэффициента корреляции аномалий АСС для ледовых характеристик, в изменениях которых прослеживаются

наиболее выраженные многолетние тренды, рассчитывались для аномалий с исключенным трендом.

Используемые в работе оценки являются сеточными по определению и рассчитываются по данным в узлах регулярных географических сеток. Модельные сетки, в которых заданы прогностические поля, не совпадают с сетками контрольных данных, поэтому поля прогнозируемых аномалий ТПО интерполируются (билинейная интерполяция) на сетку $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, в которой заданы наблюдаемые аномалии ТПО. При оценивании прогнозов сплоченности и толщины морского льда наблюдаемые поля, заданные на стереографической сетке, переводятся на модельную сетку.

В качестве критериев качества рассматривались средние ошибки (смещения) $BIAS$, средние квадраты ошибки MSE , среднеквадратичные ошибки $RMSE = \sqrt{MSE}$, коэффициенты корреляции аномалий прогностических и фактических полей ACC , показатель качества по среднему квадрату ошибки для сравнения с климатическим прогнозом $MSSS$, показатель качества вероятностных прогнозов ROC для трех градаций (ниже нормы, норма, выше нормы) [13]. Оценки рассчитывались как средние по всему Мировому океану, так и для его отдельных частей: тропики (20° ю. ш. – 20° с. ш.), северные экстра-тропики (20 – 90° с. ш.), южные экстра-тропики (20 – 90° ю. ш.), район Nino-3.4 (120 – 170° з. д., 5° ю. ш. – 5° с. ш.), Арктика, Антарктика.

Ретроспективные прогнозы

Температура поверхности океана

Дадим вначале краткую сводку оценок $BIAS$ и $RMSE$, полученных для ретроспективных прогнозов (1991–2019 гг.) аномалий ТПО по модели INM-CM5 для разных стартовых месяцев. В целом, по большинству регионов преобладающие значения смещений чаще всего находились в диапазоне $0,00$ – $0,02$, что служило указанием на некоторое завышение прогностических аномалий ТПО по сравнению с наблюдаемыми. Обратная ситуация с отдельными отрицательными смещениями прогнозов разной заблаговременности, вплоть до значений $BIAS = -0,04$, отмечалась в регионе Эль-Ниньо. Такие значения смещений не должны, однако, привести к значительным искажениям других показателей. Так, согласно разложению Мерфи [11], для критерия $MSSS$ отрицательный вклад смещения выборки равен отношению разности средних значений прогностических и наблюдаемых аномалий $(\bar{f} - \bar{a})$ к выборочной дисперсии наблюдаемых аномалий s_a^2 , которое для полученных здесь значений смещений можно оценить величинами порядка 10^{-4} – 10^{-3} .

Среднеквадратические ошибки прогнозов аномалий ТПО заметно менялись в зависимости от региона и стартового месяца прогноза. Обобщенная картина для океана в целом и его внетропических регионов

характеризуется в первые прогностические месяцы значениями $RMSE \approx 0,6$ °C с плавным нарастанием ошибок до примерно $0,7-0,8$ °C к концу интервала прогноза. Ситуация в тропиках резко отличается: для всех стартовых месяцев изменчивость ошибок на интервале прогноза незначительна и находится в диапазоне $0,4-0,5$ °C. В отличие от этого, среднеквадратические ошибки в регионе Nino-3.4 превышают тропические и для весенних и осенних прогнозов достигают $0,8-0,9$ °C.

В целом, полученные значения $RMSE$ сопоставимы с изменчивостью наблюдаемых аномалий ТПО. Эта ситуация может приводить к снижению оправдываемости прогнозов, оцениваемой в терминах показателя $MSSS$. В уже указанном разложении Мерфи соответствующий отрицательный вклад в $MSSS$ равен отношению дисперсий s_f^2 / s_a^2 , и при близости амплитуд изменчивости прогнозируемых s_f^2 и наблюдаемых s_a^2 аномалий ТПО этот член разложения может существенно влиять на среднюю оценку $MSSS$.

Коэффициенты корреляции аномалий ACC и показатели качества по среднему квадрату ошибки $MSSS$ рассчитывались для наборов ретроспективных прогнозов ТПО, составленных по двум версиям прогностической модели: INM-CM5 (1991–2019 гг.) и INM-CM6 (1991–2020 гг.). В табл. 1–3 представлены выборки результатов пересекающихся прогнозов по трем регионам для удобства их сопоставления.

Таблица 1. Средние по Мировому океану оценки $ACC/MSSS$ ретроспективных прогнозов ТПО за период 1991–2019 (2020) гг. для двух версий прогностической модели INM-CM5 и INM-CM6

Table 1. World Ocean average $ACC/MSSS$ estimates for the 1991–2019 (2020) SST hindcasts with two versions of the forecast model INM-CM5 and INM-CM6

StartMon Day0	Модель	Прогностический месяц (LeadMon)			
		1	2	3	4
01 22dec	CM5	0,56 / 0,20	0,46 / 0,02	0,41 / -0,06	0,37 / -0,10
	CM6	0,58 / 0,19	0,47 / -0,03	0,42 / -0,12	0,39 / -0,17
02 22jan	CM5	0,56 / 0,17	0,46 / 0,00	0,41 / -0,09	0,34 / -0,14
	CM6	0,59 / 0,19	0,48 / -0,02	0,42 / -0,14	0,36 / -0,20
03 22feb	CM5	0,59 / 0,22	0,46 / -0,03	0,38 / -0,11	0,34 / -0,12
	CM6	0,60 / 0,22	0,48 / -0,04	0,38 / -0,16	0,35 / -0,17
04 22mar	CM5	0,56 / 0,15	0,44 / -0,02	0,37 / -0,09	0,33 / -0,12
	CM6	0,58 / 0,16	0,45 / -0,05	0,38 / -0,13	0,34 / -0,16
05 22apr	CM5	0,56 / 0,19	0,44 / -0,01	0,37 / -0,08	0,32 / -0,11
	CM6	0,58 / 0,21	0,45 / -0,02	0,38 / -0,11	0,35 / -0,15
11 22oct	CM5	0,53 / 0,21	0,43 / 0,06	0,37 / -0,02	0,34 / -0,08
	CM6	0,56 / 0,23	0,45 / 0,07	0,40 / -0,03	0,36 / -0,12
12 22nov	CM5	0,56 / 0,23	0,45 / 0,05	0,39 / -0,05	0,36 / -0,09
	CM6	0,58 / 0,25	0,47 / 0,04	0,40 / -0,10	0,37 / -0,17

Таблица 2. Средние по тропической зоне океанов оценки ACC/MSSS ретроспективных прогнозов ТПО за период 1991–2019 (2020) гг. для двух версий прогностической модели INM-CM5 и INM-CM6

Table 2. Tropical ocean average ACC/MSSS estimates for the 1991–2019 (2020) SST hindcasts with two versions of the forecast model INM-CM5 and INM-CM6

StartMon (Day0)	Модель	Прогностический месяц (LeadMon)			
		1	2	3	4
01 22dec	CM5	0,68 / 0,51	0,58 / 0,35	0,55 / 0,30	0,52 / 0,23
	CM6	0,71 / 0,57	0,59 / 0,35	0,56 / 0,28	0,53 / 0,23
02 22jan	CM5	0,67 / 0,45	0,59 / 0,33	0,55 / 0,27	0,47 / 0,15
	CM6	0,70 / 0,53	0,61 / 0,34	0,56 / 0,26	0,47 / 0,14
03 22feb	CM5	0,70 / 0,47	0,59 / 0,29	0,51 / 0,20	0,47 / 0,15
	CM6	0,72 / 0,54	0,61 / 0,34	0,51 / 0,19	0,48 / 0,15
04 22mar	CM5	0,67 / 0,38	0,57 / 0,27	0,51 / 0,18	0,46 / 0,12
	CM6	0,69 / 0,48	0,57 / 0,28	0,50 / 0,19	0,47 / 0,14
05 22apr	CM5	0,66 / 0,42	0,57 / 0,25	0,50 / 0,18	0,44 / 0,14
	CM6	0,69 / 0,48	0,58 / 0,30	0,51 / 0,21	0,48 / 0,17
11 22oct	CM5	0,66 / 0,52	0,58 / 0,40	0,51 / 0,29	0,46 / 0,20
	CM6	0,70 / 0,61	0,62 / 0,50	0,58 / 0,41	0,50 / 0,24
12 22nov	CM5	0,69 / 0,56	0,59 / 0,39	0,52 / 0,26	0,49 / 0,22
	CM6	0,71 / 0,62	0,62 / 0,46	0,53 / 0,27	0,51 / 0,20

Таблица 3. Средние по району Nino-3.4 оценки ACC/MSSS ретроспективных прогнозов ТПО за период 1991–2019 (2020) гг. для двух версий прогностической модели INM-CM5 и INM-CM6

Table 3. Niño-3.4 region average ACC/MSSS estimates for the 1991–2019 (2020) SST hindcasts with two versions of the forecast model INM-CM5 and INM-CM6

StartMon (Day0)	Модель	Прогностический месяц (LeadMon)			
		1	2	3	4
01 22dec	CM5	0,86 / 0,75	0,80 / 0,67	0,72 / 0,53	0,69 / 0,48
	CM6	0,91 / 0,89	0,84 / 0,74	0,76 / 0,61	0,67 / 0,45
02 22jan	CM5	0,83 / 0,66	0,73 / 0,51	0,70 / 0,41	0,56 / 0,19
	CM6	0,90 / 0,85	0,81 / 0,68	0,74 / 0,56	0,54 / 0,26
03 22feb	CM5	0,83 / 0,64	0,73 / 0,31	0,62 / 0,18	0,53 / 0,21
	CM6	0,87 / 0,80	0,79 / 0,66	0,61 / 0,35	0,61 / 0,37
04 22mar	CM5	0,73 / 0,15	0,66 / 0,05	0,53 / 0,07	0,45 / 0,07
	CM6	0,83 / 0,69	0,64 / 0,39	0,52 / 0,25	0,47 / 0,24
05 22apr	CM5	0,73 / 0,23	0,57 / -0,01	0,49 / 0,08	0,40 / 0,09
	CM6	0,78 / 0,61	0,59 / 0,31	0,56 / 0,32	0,55 / 0,35
11 22oct	CM5	0,87 / 0,78	0,76 / 0,56	0,70 / 0,50	0,66 / 0,44
	CM6	0,92 / 0,90	0,86 / 0,79	0,84 / 0,71	0,74 / 0,51
12 22nov	CM5	0,86 / 0,75	0,79 / 0,64	0,71 / 0,52	0,62 / 0,41
	CM6	0,91 / 0,88	0,87 / 0,81	0,79 / 0,62	0,62 / 0,37

Как видно из таблиц, значимые с вероятностью 95 % величины *ACC* ($> 0,38$ при длине выборки 29 лет) получились для всех представленных в таблицах областей (Мировой океан, тропический пояс, район Nino-3.4) на прогностические сроки не менее 3–4 месяцев. Для Мирового океана *ACC* меняется от 0,53–0,60 на первый месяц до 0,32–0,39 на четвертый. Для тропической зоны — от 0,66–0,72 на первый месяц до 0,44–0,53 на четвертый. И наиболее высокие значения *ACC* имеют место для района Nino-3.4: от 0,73–0,92 на первый месяц до 0,4–0,74 на четвертый. Показатель *MSSS* для Мирового океана получился положительным (преимущество методического прогноза над климатическим) только для первого месяца, тогда как в тропической зоне и в районе Nino-3.4 вплоть до четырех месяцев. Наибольшие значения *MSSS*, как и в случае *ACC*, отмечаются в районе Nino-3.4.

Особо следует отметить, что во всех трех районах за редкими исключениями имеют место более высокие показатели *ACC* и *MSSS* для прогнозов по модели INM-CM6 в сравнении с прогнозами по предшествующей версии INM-CM5.

Сравнение уровня успешности сентябрьских ретроспективных прогнозов ТПО за период 1993–2016 гг. с успешностью аналогичных прогнозов зарубежных прогностических систем, участвующих в проекте C3S, в терминах показателей *ACC* и *MSSS* представлено в табл. 4–6.

Таблица 4. Оценки *ACC/MSSS* для сентябрьских ретроспективных прогнозов ТПО по моделям проекта C3S и двум версиям модели ИВМ РАН, осредненные для Мирового океана за период 1993–2016 гг.

Table 4. *ACC/MSSS* estimates for September SST hindcasts with the C3S project models and two versions of the INM model, averaged over the World Ocean for the period 1993–2016

Модель	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
CMCC_35	0,67 / 0,56	0,53 / 0,35	0,46 / 0,28	0,44 / 0,26	0,43 / 0,22	0,39 / 0,16
DWD_21	0,62 / 0,49	0,50 / 0,28	0,44 / 0,21	0,40 / 0,17	0,39 / 0,13	0,36 / 0,06
ECCC_2	0,65 / 0,53	0,50 / 0,29	0,42 / 0,20	0,37 / 0,13	0,35 / 0,06	0,33 / -0,04
ECCC_3	0,62 / 0,57	0,53 / 0,34	0,45 / 0,26	0,43 / 0,23	0,39 / 0,16	0,37 / 0,11
ECMWF_51	0,67 / 0,58	0,55 / 0,37	0,48 / 0,29	0,46 / 0,25	0,44 / 0,20	0,40 / 0,13
METEO FRANCE_8	0,62 / 0,43	0,52 / 0,28	0,44 / 0,23	0,41 / 0,19	0,39 / 0,15	0,36 / 0,10
UKMO_602	0,63 / 0,48	0,52 / 0,26	0,45 / 0,17	0,42 / 0,14	0,40 / 0,10	0,36 / 0,03
JMA_3	0,64 / 0,52	0,52 / 0,32	0,46 / 0,25	0,43 / 0,20	0,40 / 0,14	0,38 / 0,08
INM_CM5	0,58 / 0,31	0,44 / 0,06	0,36 / 0,00	0,32 / -0,01	0,29 / -0,05	0,26 / -0,10
INM_CM6	0,53 / -0,15	0,42 / -0,03	0,35 / -0,09	0,32 / -0,09		

Таблица 5. Оценки ACC/MSSS для сентябрьских ретроспективных прогнозов ТПО по моделям проекта C3S и двум версиям модели ИВМ РАН, осредненные для тропической зоны океанов за период 1993–2016 гг.

Table 5. ACC/MSSS estimates for September SST hindcasts with the C3S project models and two versions of the INM model, averaged over the tropical oceans for the period 1993–2016

Модель	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
CMCC_35	0,77 / 0,68	0,68 / 0,59	0,62 / 0,57	0,61 / 0,53	0,58 / 0,49	0,53 / 0,36
DWD_21	0,71 / 0,62	0,63 / 0,53	0,57 / 0,51	0,54 / 0,48	0,55 / 0,46	0,51 / 0,32
ECCC_2	0,75 / 0,65	0,63 / 0,45	0,57 / 0,40	0,53 / 0,33	0,50 / 0,26	0,44 / -0,02
ECCC_3	0,76 / 0,67	0,67 / 0,53	0,59 / 0,53	0,58 / 0,51	0,55 / 0,47	0,51 / 0,34
ECMWF_51	0,76 / 0,68	0,68 / 0,60	0,64 / 0,57	0,61 / 0,53	0,59 / 0,50	0,55 / 0,35
METEO FRANCE_8	0,70 / 0,58	0,64 / 0,53	0,59 / 0,51	0,57 / 0,48	0,58 / 0,46	0,51 / 0,31
UKMO_602	0,75 / 0,66	0,69 / 0,60	0,63 / 0,58	0,60 / 0,53	0,60 / 0,50	0,55 / 0,36
JMA_3	0,74 / 0,65	0,67 / 0,56	0,62 / 0,54	0,60 / 0,50	0,56 / 0,43	0,52 / 0,31
INM_CM5	0,70 / 0,56	0,55 / 0,41	0,48 / 0,37	0,45 / 0,33	0,41 / 0,23	0,37 / 0,15
INM_CM6	0,66 / 0,55	0,55 / 0,42	0,51 / 0,37	0,48 / 0,34		

Таблица 6. Оценки ACC/MSSS для сентябрьских ретроспективных прогнозов ТПО по моделям проекта C3S и двум версиям модели ИВМ РАН, осредненные для региона Nino-3.4 за период 1993–2016 гг.

Table 6. ACC/MSSS estimates for September SST hindcasts with the C3S project models and two versions of the INM model, averaged for the Nino-3.4 region for the period 1993–2016

Модель	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
CMCC_35	0,91 / 0,78	0,91 / 0,81	0,90 / 0,85	0,87 / 0,78	0,88 / 0,80	0,86 / 0,73
DWD_21	0,90 / 0,86	0,88 / 0,83	0,88 / 0,82	0,84 / 0,76	0,86 / 0,79	0,81 / 0,67
ECCC_2	0,90 / 0,76	0,89 / 0,60	0,87 / 0,62	0,83 / 0,47	0,84 / 0,41	0,80 / -0,11
ECCC_3	0,91 / 0,71	0,89 / 0,58	0,89 / 0,74	0,87 / 0,75	0,88 / 0,78	0,84 / 0,64
ECMWF_51	0,92 / 0,84	0,90 / 0,84	0,89 / 0,84	0,86 / 0,77	0,87 / 0,78	0,83 / 0,64
METEO FRANCE_8	0,90 / 0,77	0,89 / 0,76	0,88 / 0,79	0,85 / 0,71	0,86 / 0,75	0,82 / 0,66
UKMO_602	0,91 / 0,85	0,90 / 0,83	0,89 / 0,84	0,86 / 0,78	0,87 / 0,78	0,83 / 0,67
JMA_3	0,91 / 0,86	0,89 / 0,85	0,89 / 0,84	0,85 / 0,75	0,85 / 0,76	0,83 / 0,66
INM_CM5	0,87 / 0,78	0,79 / 0,67	0,76 / 0,62	0,72 / 0,57	0,69 / 0,48	0,66 / 0,40
INM_CM6	0,89 / 0,83	0,84 / 0,74	0,82 / 0,70	0,76 / 0,60		

Из общих особенностей полученных результатов следует отметить заранее неочевидный, сравнительно небольшой диапазон разброса оценок для набора моделей C3S. Характерные величины отличий составляют $\sim 0,05$ для ACC и $\sim 0,1$ для MSSS.

Как и выше, применительно к ретроспективным прогнозам ИВМ РАН, отмечается существенное улучшение оценок прогнозов пула СЗС при переходе от глобальной области к тропикам и далее к региону Эль-Ниньо. Аналогичные особенности отмечаются и для прогнозов с мартовскими стартовыми датами. Сравнение результатов оценок двух версии модели ИВМ РАН с остальными показывает, что в большинстве случаев коэффициенты корреляции аномалий ТПО для обеих версий модели оказываются примерно на 0,10–0,15 пунктов ниже. В терминах показателя *MSSS* величины занижения могут достигать 0,2–0,3 при осреднении по всему океану или по внетропическим широтам. Это отставание заметно уменьшается при переходе к тропикам, а в регионе Эль-Ниньо значения *MSSS* становятся сопоставимыми с оценками для остальных моделей.

Возможной причиной занижения оценок *MSSS* может быть предоставление прогностических полей в моделях СЗС на закругленной сетке, которое приводит к сглаживанию этих полей и, следовательно, к более благоприятному отношению амплитуд изменчивости прогнозируемых и наблюдаемых аномалий ТПО.

В целом, подводя итоги сравнения ретроспективных прогнозов ТПО, можно констатировать, что полученные результаты оценок указывают на соответствие модели ИВМ РАН мировому уровню успешности сезонных прогнозов.

Ледовые характеристики

Оценки качества ретроспективных ледовых прогнозов начнем с рассмотрения прогнозов интегральных ледовых характеристик, таких как площадь (*sea ice area*) и объем (*sea ice volume*) арктических и антарктических морских льдов.

Временные изменения аномалий площади и объема арктических морских льдов для одного из начальных сроков (1 сентября каждого года) показаны на рис. 1. Наряду со случаями успешного воспроизведения изменений площади и объема льдов на протяжении отдельных прогностических отрезков времени отчетливо просматривается и наблюдавшийся в 1991–2019 гг. междесятилетний тренд, воспроизводимый в модельных прогнозах.

Видно также, что модельный прогноз чаще всего занижает объем арктического морского льда в периоды с повышенной ледовитостью Арктики (до 1999 г.), а с 1999 и до 2013 г. преимущественно систематически завышает этот объем.

Аналогичные изменения площади и объема антарктических льдов показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, качество воспроизведения интегральных характеристик антарктических льдов уступает таковому для арктических льдов. Особенно заметно это для площади льдов, прогнозы

которой на последнем отрезке рассматриваемого периода ретроспективных прогнозов (2016–2020 гг.) по знаку аномалий оказываются в противофазе с контрольными данными.

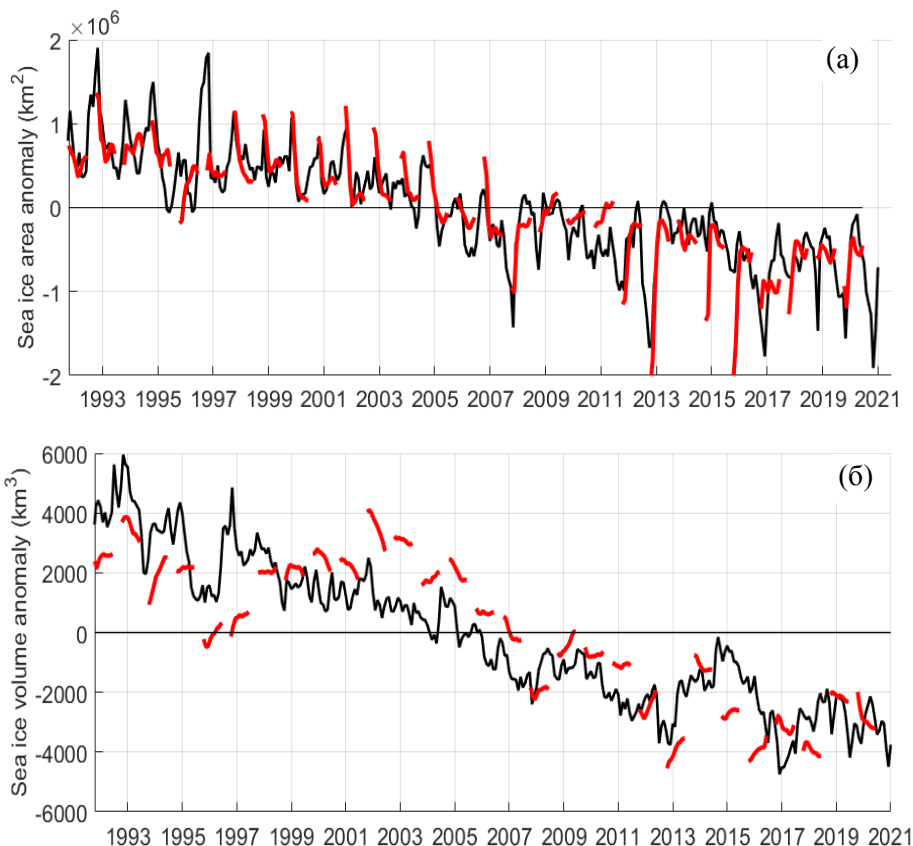


Рис. 1. Аномалии площади (км²) (а) и объема (км³) (б) арктических морских льдов в период 1991–2019 гг. по данным NSIDC (а) и PIOMAS (б) (черные линии) и по данным модельных прогнозов по модели INM-CM5 с начальными сроками 1 сентября каждого года (9-месячные отрезки красной линии).

Fig. 1. Anomalies of Arctic sea ice area (km²) (а) and volume (km³) (б) for the period 1991–2019 from NSIDC (а) and PIOMAS (б) data (black lines) and from INM-CM5 model forecasts with initial dates of September 1 of each year (9-month segments of the red line).

В табл. 7 представлены коэффициенты корреляции аномалий АСС между прогностическими значениями площади морского льда в Арктике по модели INM-CM5, полученные для разных начальных сроков в период 1991–2019 гг., и контрольными данными NSIDC и PIOMAS. Как видно из таблицы, значения АСС близки для обоих типов контрольных данных NSIDC и PIOMAS, используемых для оценки прогнозов.

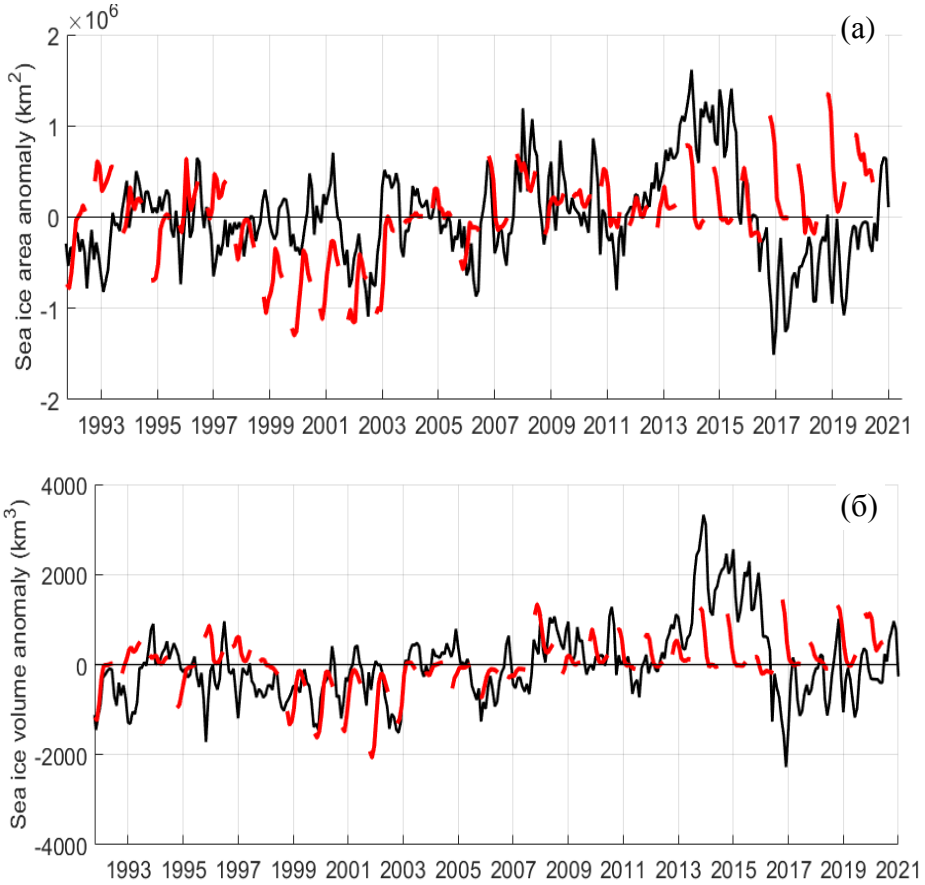


Рис. 2. Аномалии площади (км²) (а) и объема (км³) (б) антарктических морских льдов в период 1991–2019 гг. по данным PIOMAS (черные линии) и по данным модельных прогнозов по модели INM-CM5 с начальными сроками 1 сентября каждого года (9-месячные отрезки красной линии).

Fig. 2. Anomalies of Antarctic sea ice area (km²) (a) and volume (km³) (b) for the period 1991–2019 from PIOMAS data (black lines) and from INM-CM5 model forecasts with initial dates of September 1 of each year (9-month segments of the red line).

Как и следовало ожидать, в большинстве прогнозов прослеживается одинаковая тенденция: статистически значимые с вероятностью 95 % значения АСС получают максимальными для первого-второго месяцев прогноза, затем уменьшаются с ростом заблаговременности. Значимые АСС получают для прогнозов на первые 3–5 месяцев с осенними (сентябрь–декабрь) и весенними (февраль–май) стартовыми датами. Наибольший интервал заблаговременностей с успешными прогнозами (вплоть до 7 месяцев) получается для сентябрьских стартовых дат с наименьшей ледовитостью в момент старта прогноза.

Таблица 7. Коэффициенты корреляции ACC между наблюдаемыми средне-месячными аномалиями площади морского льда в Арктике по данным NSIDC (верхние числа в ячейках таблицы) и по данным PIOMAS (нижние числа в ячейках таблицы) и прогностическими аномалиями по модели INM-CM5 для разных исходных сроков ретроспективных прогнозов в период 1991–2019 гг.

Table 7. Correlation coefficients ACC between observed monthly mean Arctic sea ice area anomalies from NSIDC (upper numbers in table cells) and PIOMAS (lower numbers in table cells) and INM-CM5 forecasted anomalies for different initial hindcast dates over the period 1991–2019.

StartMon Day0	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
01 22dec	0,37 0,14	0,52 0,32	0,36 0,42	0,45 0,37	0,29 0,20	0,03 0,16
02 22jan	0,49 0,37	0,47 0,43	0,50 0,34	0,35 0,11	0,19 0,19	0,31 0,24
03 22feb	0,44 0,43	0,51 0,41	0,52 0,33	0,27 0,28	0,23 0,18	0,12 0,05
03 01mar	0,62 0,60	0,65 0,53	0,49 0,29	0,21 0,19	0,29 0,17	0,17 0,07
04 22mar	0,72 0,61	0,53 0,33	0,25 0,20	0,35 0,21	0,23 0,12	0,04 -0,06
05 22apr	0,75 0,60	0,42 0,40	0,40 0,27	0,17 0,04	0,01 -0,10	0,26 0,22
05 01may	0,78 0,62	0,38 0,33	0,35 0,23	0,12 -0,01	-0,03 -0,12	0,15 0,10
09 01sep	0,56 0,52	0,61 0,62	0,53 0,57	0,73 0,71	0,39 0,55	0,23 0,31
10 01oct	0,86 0,87	0,43 0,51	0,59 0,57	0,39 0,54	0,19 0,29	0,29 0,37
11 22oct	0,58 0,62	0,62 0,62	0,45 0,57	0,22 0,30	0,23 0,33	0,43 0,39
11 01nov	0,77 0,84	0,71 0,74	0,46 0,66	0,25 0,30	0,31 0,40	0,48 0,51
12 22nov	0,77 0,79	0,49 0,62	0,36 0,39	0,40 0,52	0,39 0,40	0,11 0,04

Примечание. Статистически значимые с вероятностью 95 % значения ACC ($\geq 0,38$) выделены жирным шрифтом. Statistically significant ACC values ($\geq 0,38$) with 95% probability are highlighted in bold.

В табл. 8 представлены коэффициенты корреляции ACC между прогностическими значениями объема морских льдов в Арктике по модели INM-CM5, соответствующими разным исходным срокам прогнозов в период 1991–2019 гг., и данными реанализа PIOMAS. Как видно из таблицы, значения ACC для объема морского льда заметно ниже, чем для площади морских льдов, что, очевидно, обусловлено различным воспроизведением толщин морского льда по модели INM-CM5 и в реанализе PIOMAS. Наименее удачными получились прогнозы объема морского льда (все ACC статистически не значимы) для начальных сроков в период с января по май.

В прогнозах с начальными сроками с октября по декабрь получают статистически значимые корреляции, по крайней мере для первых трех месяцев прогноза.

Таблица 8. Коэффициенты корреляции ACC между прогностическими и наблюдаемыми (данные PIOMAS) среднемесячными аномалиями объема морских льдов в Арктике для разных исходных сроков ретроспективных прогнозов по модели INM-CM5 в период 1991–2019 гг.

Table 8. Correlation coefficients ACC between predicted and observed (PIOMAS data) monthly mean Arctic sea ice area anomalies for different INM-CM5 hindcast start dates for the period 1991–2019

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
01 (22dec)	-0,05	0,10	0,10	0,15	0,04	0,17
02 (22jan)	0,03	0,03	-0,08	-0,19	0,16	0,19
03 (22feb)	0,04	-0,07	-0,10	0,18	0,20	-0,02
03 (01mar)	0,08	-0,01	-0,03	0,09	0,11	-0,08
04 (22mar)	0,09	0,06	0,18	0,28	-0,03	-0,21
05 (22apr)	0,20	0,38	0,31	-0,06	-0,18	-0,04
05 (01may)	0,17	0,32	0,33	-0,04	-0,16	-0,12
09 (01sep)	0,29	0,37	0,57	0,63	0,39	0,31
10 (01oct)	0,62	0,62	0,54	0,30	0,27	0,32
11 (22oct)	0,66	0,59	0,39	0,33	0,32	0,25
11 (01nov)	0,69	0,65	0,58	0,42	0,45	0,45
12 (22nov)	0,60	0,54	0,46	0,54	0,51	0,25

Примечание. Статистически значимые с вероятностью 95 % значения ACC ($\geq 0,38$) выделены жирным шрифтом. Statistically significant ACC values ($\geq 0,38$) with 95% probability are highlighted in bold.

Стоит отметить, что прогнозы от 1 ноября дают наилучший результат для объема морского льда: коэффициенты ACC статистически значимы для всех шести месяцев прогноза, хотя начиная с четвертого месяца прогноз воспроизводит только около 20 % изменчивости PIOMAS.

Оценкой качества прогнозов, характеризующей их эффективность в сравнении с прогнозами по климату, является показатель по среднему квадрату ошибки MSSS (Mean Squared Skill Score). Значения этого показателя для модельных прогнозов площади морского льда в Арктике приведены в табл. 9, а для прогнозов объема – в табл. 10.

Таблица 9. Значения критерия качества *MSSS* для ретроспективных прогнозов аномалий площади морских льдов в Арктике по модели INM-CM5 в сопоставлении с данными NSIDC для разных исходных сроков в период 1991–2019 гг.

Table 9. *MSSS* quality criterion values for retrospective forecasts of Arctic sea ice area anomalies using the INM-CM5 model compared with NSIDC data for different initial dates within the period 1991–2019

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
01 (22dec)	0,41	0,35	0,04	0,45	0,13	0,14
02 (22jan)	0,35	0,03	0,35	0,19	0,32	0,59
03 (22feb)	0,19	0,39	0,37	0,32	0,36	0,33
03 (01mar)	0,37	0,58	0,44	0,17	0,38	0,34
04 (22mar)	0,64	0,57	0,36	0,41	0,23	0,12
05 (22apr)	0,64	0,34	0,18	0,02	-0,05	0,21
05 (01may)	0,36	-0,05	0,02	-0,26	-0,34	-0,04
09 (01sep)	0,56	0,71	0,82	0,84	0,62	0,48
10 (01oct)	0,91	0,69	0,81	0,61	0,34	0,21
11 (22oct)	0,81	0,82	0,65	0,38	0,25	0,48
11 (01nov)	0,87	0,84	0,61	0,44	0,32	0,36
12 (22nov)	0,81	0,59	0,27	0,35	0,54	0,22

Таблица 10. Значения критерия качества *MSSS* для ретроспективных прогнозов аномалий объема морских льдов в Арктике по модели INM-CM5 в сопоставлении с данными PIOMAS для разных исходных сроков в период 1991–2019 гг.

Table 10. *MSSS* quality criterion values for retrospective forecasts of Arctic sea ice volume anomalies using the INM-CM5 model compared with PIOMAS data for different initial dates within the period 1991–2019

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
01 (22dec)	0,21	0,24	0,27	0,28	0,24	0,20
02 (22jan)	0,21	0,21	0,20	0,16	0,16	0,22
03 (22feb)	0,20	0,20	0,18	0,14	0,20	0,21
03 (01mar)	0,16	0,17	0,15	0,07	0,18	0,21
04 (22mar)	0,15	0,14	0,11	0,22	0,22	0,19
05 (22apr)	0,14	0,13	0,21	0,20	0,17	0,16
05 (01may)	0,13	0,09	0,18	0,14	0,11	0,08
09 (01sep)	0,46	0,35	0,30	0,28	0,24	0,27
10 (01oct)	0,46	0,33	0,30	0,26	0,29	0,35
11 (22oct)	0,34	0,29	0,26	0,28	0,33	0,34
11 (01nov)	0,32	0,27	0,25	0,26	0,33	0,35
12 (22nov)	0,27	0,25	0,27	0,33	0,35	0,28

Величины *MSSS*, близкие к единице, соответствуют высокому качеству модельного прогноза по отношению к климатическому прогнозу. Почти все приведенные в табл. 9 и 10 значения *MSSS* оказываются положительными, свидетельствуя о более высоком качестве методических прогнозов в сравнении с климатическим. По сезонным особенностям отмечается сходство с картиной *ACC*. Наиболее успешными получились прогнозы для сентябрьских стартовых дат. Аналогичные особенности *MSSS* имеют место и для объема арктических льдов

В табл. 11 и 12 приведены коэффициенты корреляции *ACC* между контрольными аномалиями сплоченности (данные NSIDC) и толщины (данные PIOMAS) арктических морских льдов, с одной стороны, и прогностическими аномалиями по двум версиям прогностической модели: INM-CM6 (верхние числа в ячейках таблиц, помечены синим) и INM-CM5 (нижние числа в ячейках таблиц), с другой стороны, для разных исходных сроков ретроспективных прогнозов в период 1991–2019 гг.

Таблица 11. Средние по Арктической области коэффициенты корреляции *ACC* между наблюдаемыми (данные NSIDC) среднемесячными аномалиями сплоченности морского льда и прогностическими аномалиями по моделям INM-CM6 (помечены синим) и INM-CM5 (нижние числа в ячейках таблицы) для разных исходных сроков ретроспективных прогнозов в период 1991–2019 гг.

Table 11. Arctic-averaged correlation coefficients *ACC* between observed (NSIDC data) monthly mean sea ice concentration anomalies and forecast anomalies from the INM-CM6 (marked in blue) and INM-CM5 (lower numbers in the table cells) models for different initial hindcast dates within the period 1991–2019

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
01 (22dec)	0,19	0,18	0,16	0,15	–	–
01 (22dec)	0,11	0,13	0,10	0,08	0,08	0,09
02 (22jan)	0,30	0,20	0,18	0,19	–	–
02 (22jan)	0,13	0,10	0,08	0,08	0,09	0,08
03 (22feb)	0,30	0,24	0,16	0,19	–	–
03 (22feb)	0,10	0,08	0,08	0,09	0,08	0,07
04 (22mar)	0,32	0,25	0,26	0,27	–	–
04 (22mar)	0,14	0,11	0,07	0,09	0,06	0,15
05 (22apr)	0,29	0,27	0,32	0,30	–	–
05 (22apr)	0,12	0,10	0,13	0,11	0,17	0,15
06 (22may)	0,37	0,43	0,43	0,38	–	–
06 (22may)	–	–	–	–	–	–
07 (22jun)	0,48	0,40	0,38	0,32	–	–
07 (22jun)	–	–	–	–	–	–
08 (22jul)	0,48	0,38	0,36	0,23	–	–
08 (22jul)	–	–	–	–	–	–
09 (22aug)	0,53	0,39	0,24	0,23	–	–
09 (01sep)	0,38	0,30	0,22	0,19	0,18	0,12
10 (22sep)	0,46	0,28	0,20	0,18	–	–
10 (01oct)	0,47	0,29	0,18	0,15	0,10	0,11
11 (22oct)	0,36	0,27	0,17	0,15	–	–
11 (01nov)	0,37	0,21	0,17	0,14	0,14	0,11
12 (22nov)	0,34	0,24	0,17	0,15	–	–
12 (22nov)	0,27	0,20	0,17	0,15	0,14	0,09

Таблица 12. Средние по Арктической области коэффициенты корреляции ACC между наблюдаемыми (данные PIOMAS) среднемесячными аномалиями толщины морского льда и прогностическими аномалиями по моделям INM-CM6 (помечены синим) и INM-CM5 (нижние числа в ячейках таблицы) для разных исходных сроков ретроспективных прогнозов в период 1991–2019 гг.

Table 12. Arctic-averaged correlation coefficients ACC between observed (PIOMAS data) monthly mean sea ice thickness anomalies and forecast anomalies from the INM-CM6 (upper numbers in the table cells, marked in blue) and INM-CM5 (lower numbers in the table cells) models for different initial hindcast dates within the period 1991–2019

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
01 (22dec)	0,28	0,32	0,34	0,36	–	–
01 (22dec)	0,50	0,48	0,46	0,47	0,48	0,45
02 (22jan)	0,56	0,52	0,49	0,48	–	–
02 (22jan)	0,26	0,28	0,28	0,33	0,31	0,33
03 (22feb)	0,53	0,49	0,48	0,44	–	–
03 (22feb)	0,26	0,28	0,32	0,31	0,31	0,31
04 (22mar)	0,55	0,53	0,48	0,39	–	–
04 (22mar)	0,30	0,33	0,31	0,30	0,30	0,30
05 (22apr)	0,56	0,48	0,41	0,38	–	–
05 (22apr)	0,31	0,29	0,28	0,28	0,30	0,21
06 (22may)	0,52	0,45	0,47	0,45	–	–
06 (22may)	–	–	–	–	–	–
07 (22jun)	0,54	0,50	0,50	0,41	–	–
07 (22jun)	–	–	–	–	–	–
08 (22jul)	0,56	0,53	0,44	0,38	–	–
08 (22jul)	–	–	–	–	–	–
09 (22aug)	0,57	0,47	0,44	0,42	–	–
09 (01sep)	0,27	0,20	0,43	0,42	0,42	0,39
10 (22sep)	0,23	0,48	0,44	0,40	–	–
10 (01oct)	0,23	0,49	0,44	0,43	0,38	0,37
11 (22oct)	0,54	0,47	0,43	0,42	–	–
11 (01nov)	0,53	0,48	0,45	0,44	0,40	0,40
12 (22nov)	0,55	0,52	0,49	0,45	–	–
12 (22nov)	0,53	0,49	0,46	0,44	0,44	0,45

Примечание. Статистически значимые с вероятностью 95 % значения ACC ($\geq 0,38$) выделены жирным шрифтом. Statistically significant ACC values ($\geq 0,38$) with 95% probability are highlighted in bold.

В табл. 11 и 12 отчетливо просматривается повышение качества прогнозов как сплоченности, так и толщины арктических льдов в версии INM-CM6 в сравнении с INM-CM5. Прогнозы сплоченности оказываются информативными (со статистически значимыми ACC) для стартовых сроков с июня по октябрь, а прогнозы толщины – для всех стартовых сроков.

Оценки качества ретроспективных вероятностных прогнозов сплоченности и толщины арктических льдов по модели INM-CM5 приведены в табл. 13 и 14. Приведенные в таблицах числа представляют собой интегральную оценку точности вероятностных прогнозов (вычисляемую как

площадь, ограниченная *ROC*-кривой и осью доли ложных положительных классификаций) с осреднением по всей Арктике для одной из серий прогнозов, стартовавших 1 сентября каждого года в период 1991–2019 гг.

Таблица 13. Оценки качества ретроспективных вероятностных прогнозов сплоченности морских льдов в Арктике по модели INM-CM5 в терминах показателя *ROC* для прогнозов с начальными сроками 1 сентября каждого года в период 1991–2019 гг.

Table 13. Quality assessments of retrospective probabilistic forecasts of Arctic sea ice concentration using the INM-CM5 model in terms of the *ROC* index for forecasts with initial dates of 1 September each year within the period 1991–2019

	Прогностический месяц								
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V
Ниже нормы	0,50	0,50	0,49	0,50	0,50	0,50	0,51	0,50	0,50
Норма	0,54	0,50	0,50	0,53	0,50	0,50	0,51	0,51	0,50
Выше нормы	0,57	0,56	0,56	0,57	0,55	0,55	0,55	0,55	0,56

Таблица 14. Оценки качества ретроспективных вероятностных прогнозов толщины морских льдов в Арктике по модели INM-CM5 в терминах показателя *ROC* для прогнозов с начальными сроками 1 сентября каждого года в период 1991–2019 гг.

Table 14. Quality assessments of retrospective probabilistic forecasts of Arctic sea ice thickness using the INM-CM5 model in terms of the *ROC* index for forecasts with initial dates of 1 September each year within the period 1991–2019

	Прогностический месяц								
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V
Ниже нормы	0,53	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,55	0,54	0,54
Норма	0,50	0,49	0,50	0,50	0,50	0,52	0,52	0,52	0,52
Выше нормы	0,50	0,50	0,50	0,49	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51

Из таблиц видно, что показатели *ROC* как для сплоченности льдов, так и для их толщины чаще всего близки к пороговому значению информативности, равному 0,5. Для сплоченности более высокие показатели *ROC* отмечаются в градации «выше нормы», а для толщины – в градации «ниже нормы».

Географические особенности оценок качества прогнозов сплоченности и толщины морских льдов по модели INM-CM5 рассмотрим на примере прогнозов со стартовой датой 1 сентября, которой соответствует минимальная в сезонном ходе ледовитость морей Северного полушария.

На рис. 3 показаны коэффициенты ACC между прогностическими и контрольными по данным NSIDC среднемесячными аномалиями сплоченности морских льдов, а на рис. 4 – между прогностическими и контрольными по данным PIOMAS аномалиями толщины льдов.

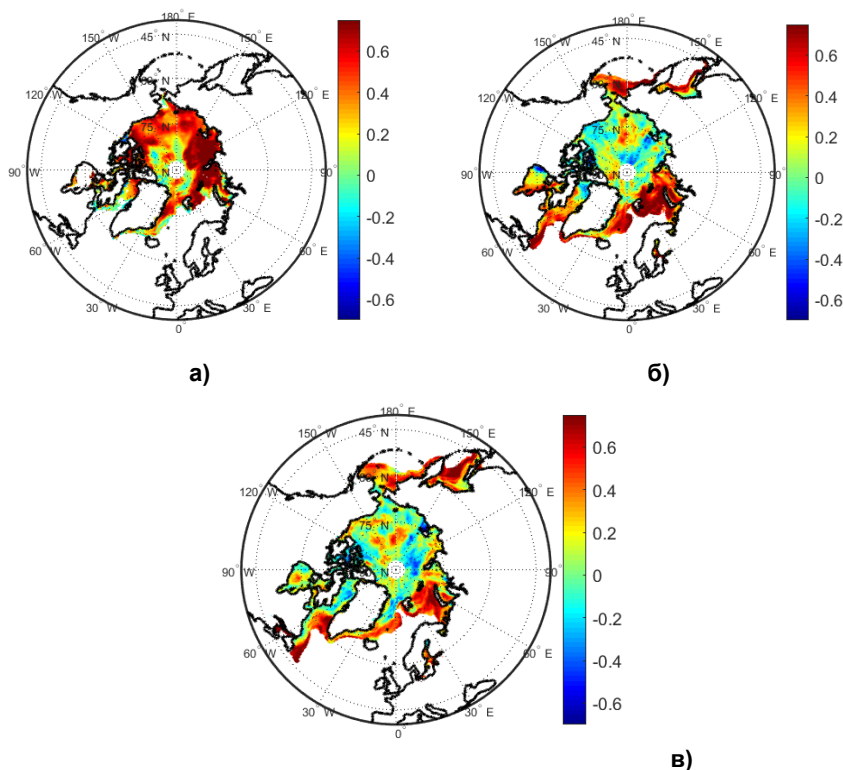


Рис. 3. Коэффициенты корреляции аномалий ACC (величины $\geq 0,38$ статистически значимы с вероятностью 95 %) между прогностическими и наблюдаемыми (данные NSIDC) среднемесячными аномалиями сплоченности морских льдов для ретроспективных прогнозов по модели INM-CM5 с начальной датой 1 сентября каждого года в период 1991–2019 гг. на сентябрь (а), январь (б) и март (в) месяцы.

Fig. 3. Anomaly correlation coefficients ACC (values $\geq 0,38$ are statistically significant with a probability of 95 %) between predicted and observed (NSIDC data) monthly mean sea ice concentration anomalies for INM-CM5 hindcasts with a starting date of September 1 of each year within the period 1991–2019 for the months of September (a), January (б), and March (в).

Как видно из этих рисунков, высокие значения ACC для сплоченности получаются в периферийной зоне арктических льдов. С ростом заблаговременности площади областей с высокими величинами ACC сокращаются, оставаясь значимыми только в Беринговом и Охотском морях, а также в Северной Атлантике, Гренландском море и Девисовом проливе.

Такие же географические особенности отмечаются и для толщины морских льдов с тенденцией к повышению АСС в периферийной зоне. Но, в отличие от сплоченности, с ростом заблаговременности площади с высокими величинами АСС не уменьшаются до января. С февраля месяца площади с высокими величинами АСС уменьшаются, оставаясь значительными в прибрежных регионах (рис. 4в).

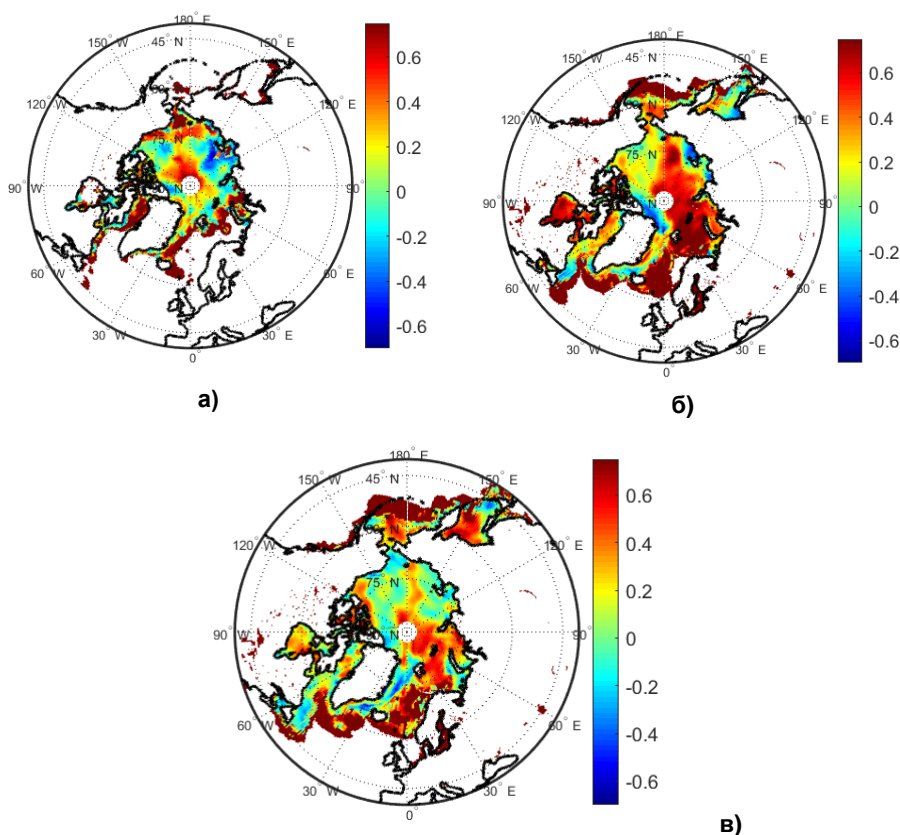


Рис. 4. Коэффициенты корреляции АСС (величины $\geq 0,38$ статистически значимы с вероятностью 95 %) между прогностическими и наблюдаемыми (данные PIOMAS) аномалиями толщины морских льдов для ретроспективных прогнозов по модели INM-CM5 с начальной датой 1 сентября каждого года в период 1991–2019 гг. на сентябрь (а), январь (б) и март (в) месяцы.

Fig. 4. Anomaly correlation coefficients ACC (values $\geq 0,38$ are statistically significant with a probability of 95 %) between predicted and observed (PIOMAS data) monthly mean sea ice thickness anomalies for INM-CM5 hindcasts with a starting date of September 1 of each year within the period 1991–2019 for the months of September (a), January (б), and March (в).

В табл. 15 и 16 приведены коэффициенты корреляции аномалий АСС между прогностическими и наблюдаемыми (данные NSIDC) среднемесячными аномалиями площади и сплоченности морских льдов в Арктике для двух исходных сроков (март и сентябрь) сезонных ретроспективных прогнозов в период 1993–2016 гг. для различных прогностических моделей, участвующих в проекте С3S, включая модель INM-CM5 (площадь и сплоченность) и INM-CM6 (сплоченность).

Таблица 15. Коэффициенты корреляции АСС между прогностическими и наблюдаемыми (данные NSIDC) среднемесячными аномалиями площади морских льдов в Арктике для двух исходных сроков (март и сентябрь) сезонных ретроспективных прогнозов в период 1993–2016 гг. для различных прогностических моделей, участвующих в проекте С3S, включая модель INM-CM5

Table 15. Correlation coefficients (ACC) between predicted and observed (NSIDC data) monthly mean Arctic sea ice area anomalies for two initial dates (March and September) of seasonal hindcasts for the period 1993–2016 for different forecast models participating in the C3S project, including the INM-CM5 model

Модель	Прогностический месяц											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
INM-CM5	0,62	0,65	0,49	0,21	0,29	0,17	0,56	0,61	0,53	0,73	0,38	0,23
CMCC	0,71	0,80	0,70	0,46	0,16	-0,04	0,92	0,82	0,35	0,36	0,41	0,42
ECMWF	0,76	0,74	0,69	0,40	0,31	0,44	0,90	0,83	0,35	0,45	0,34	0,36
JMA	0,56	0,59	0,48	0,42	0,28	0,36	0,88	0,75	-0,0	0,12	0,17	0,38
METEO France	0,66	0,62	0,64	0,57	0,38	0,14	0,77	0,88	0,45	0,59	0,56	0,27
ECCC_3	0,87	0,83	0,69	0,35	0,14	0,39	0,95	0,87	0,48	0,72	0,34	0,27
ECCC	0,73	0,63	0,29	0,40	0,25	0,23	0,92	0,82	0,41	0,19	0,18	0,25
DWD	0,78	0,75	0,58	0,07	-0,09	0,06	0,89	0,86	0,40	0,48	0,20	0,32
UKMO	0,61	0,77	0,69	0,22	-0,11	-0,13	0,87	0,86	0,41	0,62	0,41	0,31

Примечание. Статистически значимые с вероятностью 95 % значения АСС (> 0,40) выделены жирным шрифтом. Красным помечены прогнозы по модели INM-CM5, превосходящие соответствующие прогнозы всех прочих моделей. Statistically significant ACC values (>0,40) with a 95 % probability are highlighted in bold. INM-CM5 forecasts that are superior to all other models are marked in red.

Таблица 16. Средние по Арктической области коэффициенты корреляции ACC между наблюдаемыми (данные NSIDC) и прогностическими среднемесячными аномалиями сплоченности морских льдов от двух начальных сроков (сентябрь и март) сезонных ретроспективных прогнозов 1993–2016 гг. для различных прогностических моделей, участвующих в проекте C3S, включая модели INM-CM5 и **INM-CM6** (помечено синим)

Table 16. Arctic-averaged correlation coefficients ACC between observed (NSIDC data) and predicted monthly mean sea ice concentration anomalies from two initial dates (September and March) of the 1993–2016 seasonal hindcasts for different forecast models participating in the C3S project, including INM-CM5 and **INM-CM6** (marked in blue)

Модель	Прогностический месяц											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
INM-CM5	0,37	0,32	0,21	0,18	0,19	0,10						
							0,10	0,09	0,09	0,06	0,07	0,07
INM-CM6	0,53	0,39	0,24	0,23								
							0,30	0,24	0,16	0,19		
CMCC	0,68	0,42	0,24	0,19	0,12	0,12						
							0,32	0,23	0,22	0,19	0,26	0,26
ECMWF	0,67	0,49	0,24	0,21	0,10	0,10						
							0,37	0,24	0,20	0,24	0,24	0,24
JMA	0,60	0,46	0,17	0,13	0,08	0,11						
							0,25	0,25	0,20	0,14	0,10	0,11
METEO France	0,54	0,48	0,28	0,24	0,12	0,13						
							0,28	0,23	0,22	0,18	0,30	0,03

Примечание. Статистически значимые с вероятностью 95 % значения ACC (> 0,40) выделены жирным шрифтом. Statistically significant ACC values (>0.40) with a 95 % probability are highlighted in bold.

Из этих таблиц следует, что ACC большинства представленных в таблицах прогнозов по модели ИВМ РАН находятся внутри диапазона разброса оценок зарубежных моделей. А прогнозы площади по INM-CM5 с мартовскими стартовыми датами на третий (май) и четвертый (июнь) месяцы превосходят прогнозы всех прочих моделей.

Из сопоставления первых двух строк табл. 16 с очевидностью также следует повышение качества прогнозов с переходом от версии INM-CM5 к версии INM-CM6.

Сопоставимость оценок ACC по модели ИВМ РАН с таковыми зарубежных моделей можно рассматривать как подтверждение наличия у этой модели эффективного прогностического потенциала в отношении ледовых характеристик на сезонных масштабах времени и соответствия мировому уровню построенной на модели ИВМ РАН системы прогнозирования.

Квазиоперативные прогнозы

Температура поверхности океана

Оценки этого типа прогнозов проводились для отдельных прогностических расчетов, выполняемых в 2021–2024 гг. по двум версиям модели ИВМ РАН. Более высокие показатели АСС для ТПО по модели INM-CM6 в сравнении с INM-CM5 получились и в квазиоперативных прогнозах, представленных в табл. 17–19 за 2023 г. с осреднением по трем районам: Мировому океану (табл. 17), тропической зоне океанов (табл. 18) и району Nino-3.4 (табл. 19). Типичные в этот период значения АСС получились даже выше, чем в ретроспективных прогнозах, в ряде случаев достигая 0,8–0,9.

Для Мирового океана зависимость оценок от приуроченности стартового месяца к тому или иному сезону не особенно выражена, в то время как в районе Nino-3.4 менее успешными получаются прогнозы от стартовых месяцев с ноября по февраль вследствие, вероятно, попадания прогностического интервала в диапазон так называемого весеннего прогностического барьера.

Таблица 17. Средние по Мировому океану оценки АСС квазиоперативных прогнозов ТПО за 2023 г. по двум версиям прогностической модели INM-CM5/INM-CM6

Table 17. World Ocean average ACC estimates of 2023 quasi-operational SST forecasts with two versions of the INM-CM5/INM-CM6 forecast model

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
01 (22dec)	/0,56	/0,46	/0,35	/0,28		
02 (22jan)	0,39/0,52	0,23/0,35	0,16/0,24	0,16/0,18	0,09/	0,15/
03 (22feb)	0,42/0,54	0,32/0,42	0,25/0,35	0,19/0,24	0,17/	0,27/
04 (22mar)	/0,54	/0,41	/0,24	/0,14		
05 (22apr)	/0,53	/0,29	/0,12	/0,16		
06 (22may)	/0,51	/0,27	/0,27	/0,30		
07 (22jun)	/0,54	/0,45	/0,45	/0,41		
08 (22jul)	/0,52	/0,54	/0,48	/0,45		
09 (22aug)	0,51/0,56	0,43/0,49	0,39/0,49	0,36/0,48	0,25/	0,22/
10 (22sep)	0,56/0,59	0,47/0,50	0,40/0,46	0,25/0,34	0,26/	0,18/
11 (22oct)	0,49/0,57	0,40/0,46	0,29/0,33	0,22/0,29	0,17/	0,13/
12 (22nov)	0,53/0,61	0,38/0,48	0,30/0,39	0,28/0,35	0,26/	0,19/

Таблица 18. Средние по тропической зоне океанов оценки АСС квазиоперативных прогнозов ТПО за 2023 г. по двум версиям прогностической модели INM-CM5/INM-CM6

Table 18. Tropical Ocean average ACC estimates of 2023 quasi-operational SST forecasts with two versions of the INM-CM5/INM-CM6 forecast model

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
01 (22dec)	/0,66	/0,44	/0,31	/0,14		
02 (22jan)	0,39/0,53	0,21/0,23	0,20/0,11	0,28/0,18	0,20/	0,34/
03 (22feb)	0,42/0,51	0,35/0,36	0,44/0,40	0,45/0,35	0,41/	0,44/
04 (22mar)	/0,47	/0,36	/0,36	/0,41		
05 (22apr)	/0,69	/0,56	/0,52	/0,51		
06 (22may)	/0,68	/0,61	/0,64	/0,66		
07 (22jun)	/0,83	/0,77	/0,76	/0,63		
08 (22jul)	/0,84	/0,80	/0,68	/0,62		
09 (22aug)	0,80/0,85	0,65/0,71	0,61/0,72	0,52/0,68	0,42/	0,30/
10 (22sep)	0,81/0,81	0,67/0,75	0,55/0,63	0,43/0,48	0,30/	0,18/
11 (22oct)	0,76/0,83	0,61/0,69	0,49/0,51	0,38/0,36	0,24/	0,15/
12 (22nov)	0,76/0,80	0,59/0,63	0,48/0,57	0,35/0,42	0,28/	0,14/

Таблица 19. Средние по району Nino-3.4 оценки АСС квазиоперативных прогнозов ТПО за 2023 г. по двум версиям прогностической модели INM-CM5/INM-CM6

Table 19. Nino-3.4 average ACC estimates of 2023 quasi-operational SST forecasts with two versions of the INM-CM5/INM-CM6 forecast model

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
01 (22dec)	/0,48	/0,22	/0,45	/0,16		
02 (22jan)	-0,02 /0,31	0,40/0,47	-0,21/0,22	0,69/0,41	0,41/	0,69/
03 (22feb)	0,70/0,80	0,03/0,55	0,66/0,67	0,79/0,71	0,72/	0,63/
04 (22mar)	/0,13	/0,60	/0,28	/0,72		
05 (22apr)	/0,79	/0,87	/0,69	/0,58		
06 (22may)	/0,90	/0,93	/0,75	/0,74		
07 (22jun)	/0,90	/0,82	/0,75	/0,20		
08 (22jul)	/0,80	/0,79	/0,34	/0,02		
09 (22aug)	0,74/0,86	0,14/0,53	-0,04/0,32	0,08/0,17	0,01/	0,07/
10 (22sep)	0,59/0,56	0,11/0,41	0,35/0,55	0,31/0,53	0,19/	0,20/
11 (22oct)	0,20/0,36	0,30/0,52	0,24/0,43	0,06/0,15	0,21/	0,33/
12 (22nov)	0,42/0,63	0,30/0,56	0,20/0,57	0,41/-0,11	0,41/	0,03/

Ледовые характеристики

Значения площадей арктических льдов в серии квазиоперативных прогнозов с моделью INM-CM5 за 2022–2023 гг. получились преимущественно завышенными (на 10–15 %) в сравнении с данными NSIDC. Отличия прогнозируемых значений от данных NSIDC оказались наибольшими для зимних месяцев с января по апрель (более 10 %) и наименьшие для мая 2022 г. (0–8 %) и сентября 2023 г. (2–10 %). Преимущественно завышенными оказались и прогнозы площадей в Антарктике с еще большими в сравнении с Арктикой типичными отклонениями от данных NSIDC в 15–30 %.

Коэффициенты корреляции *ACC* между наблюдаемыми аномалиями сплоченности морского льда в Арктике (данные NSIDC) и прогностическими аномалиями для разных исходных сроков квазиоперативных прогнозов за 2022–2023 гг. с двумя версиями модели ИВМ РАН представлены в табл. 20, а между аналогичными аномалиями толщины льдов (данные PIOMAS) – в табл. 21.

Как видно из табл. 20, показатели качества *ACC* для сплоченности льдов в Арктике испытывают большие колебания от срока к сроку и нередко оказываются отрицательными. Вместе с тем отчетливо просматривается повышение качества прогнозов по модели INM-CM6 в сравнении с INM-CM5. Число прогнозов сплоченности со значимыми положительными *ACC* по модели INM-CM6 за этот период превышает 20, тогда как ни один из прогнозов по модели INM-CM5 таких значимых оценок не имеет.

Обращают на себя внимание заметные отличия рассматриваемых здесь оценок *ACC* в квазиоперативных прогнозах от подобных оценок в ретроспективных прогнозах (см. табл. 11), где они было всюду положительными и заметно превышали значения из табл. 20. Дело в том, что *ACC* ретроспективных прогнозов, представленные в табл. 11, характеризуют структуру временной изменчивости аномалий сплоченности, в то время как *ACC* квазиоперативных прогнозов, представленные в табл. 20, характеризуют пространственную структуру аномалий.

Как видим, сходные по названию показатели ретроспективных и квазиоперативных прогнозов заметно различаются как по смыслу оцениваемых характеристик, так и по их цифровым оценкам.

Еще больше отрицательных значений *ACC* встречаются в прогнозах толщины арктических льдов (табл. 21). Типичные значения *ACC* здесь заметно ниже, нежели для сплоченности, и значимые положительные *ACC* встречаются в совсем небольшом числе случаев.

Вероятностные оценки квазиоперативных прогнозов сплоченности льдов в Арктике в терминах показателя *ROC* характеризуются значениями $ROC = 0,50–0,59$ для градации «ниже нормы», $ROC = 0,55–0,71$ для градации «норма» и $ROC = 0,55–0,75$ для градации «выше нормы». Таким образом, оценки прогнозов всех трех градациях оказываются выше случайных с наилучшими результатами для градации «выше нормы».

Таблица 20. Коэффициенты корреляции АСС между прогностическими и контрольными (данные NSIDC) среднемесячными аномалиями сплоченности морского льда в Арктике для разных исходных сроков квазиоперативных прогнозов по моделям INM-CM5 (первые числа в каждой из табличных ячеек) и INM-CM6 (выделенные синим вторые числа в ячейках) в период 2022–2023 гг.

Table 20. Correlation coefficients ACC between forecast and control (NSIDC data) monthly mean Arctic sea ice concentration anomalies for different initial dates of quasi-operational forecasts with INM-CM5 (first numbers in table cells) and INM-CM6 (second numbers in cells highlighted in blue) models during the period 2022–2023

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
2022 г.						
01 (22dec)	0,13/ 0,12	0,02/ 0,04	-0,01/ 0,24	0,05/ 0,07	0,10/	0,03/
02 (22jan)	0,02/ 0,14	0,14/ 0,28	0,05/ 0,22	0,14/ 0,46	0,15/	-0,01/
03 (22feb)	0,04 / 0,04	0,08/ 0,01	0,15/ 0,19	0,15/	0,03/	-0,09/
04 (22mar)	0,05/ 0,17	0,12/ 0,05	0,14/	-0,02/	-0,01/	0,11/
05 (22apr)	0,12/ 0,61	0,18/	-0,08/	0,01/	0,10/	0,07/
06 (22may)	/0,12	/0,14				
07 (22jun)	/0,17	/0,11	/0,57	/0,01		
08 (22jul)	/0,24	/0,05	/0,10	/0,25		
09 (22aug)	/0,29	/0,17	/0,23	/0,44		
10 (22sep)	-0,09/ 0,08	0,03/ 0,26	0,13/ 0,54	0,18/ 0,16	0,15/	0,11/
11 (22oct)	0,08/ 0,18	0,11/ 0,29	0,11/ 0,00	0,10/ 0,06	0,10/	0,09/
12 (22nov)	-0,04/ 0,04	0,05 -0,11	0,09/ 0,56	0,08/ 0,31	0,07/	0,05/
2023 г.						
01 (22dec)	/0,12	/0,52	/0,06	/0,41		
02 (22jan)	0,00/ 0,12	0,02/ 0,12	0,08/ 0,43	0,07/ 0,38	-0,02/	-0,06/
03 (22feb)	0,02/ 0,07	0,06 /0,21	-0,03/ 0,00	-0,01/ 0,01	-0,01/	-0,09/
04 (22mar)	/0,08	/0,38	/0,00			
05 (22apr)	/0,22	/0,18				
06 (22may)	/0,09	/0,82	/0,00			
07 (22jun)	/0,11	/0,57	/0,39	/0,00		
08 (22jul)	/0,01	/0,18	/0,31	/0,04		
09 (22aug)	-0,09/ 0,64	-0,10/ 0,39	-0,09/ 0,10	-0,07/ 0,19	016/	
10 (22sep)	-0,09/ 0,20	-0,12/ 0,06	-0,10/ 0,35	0,20/ 0,02		
11 (22oct)	0,09/ 0,34	-0,04/ 0,04	-0,08/ 0,12	/0,05		
12 (22nov)	-0,01/ 0,00	-011/ 0,08	/0,07	/0,15		

Примечание. Статистически значимые с вероятностью 95 % значения коэффициентов корреляции (> 0,14 по Z-критерию Фишера) выделены жирным шрифтом. Statistically significant with a probability of 95 % values of correlation coefficients (> 0,14 according to Fisher's Z-criterion) are highlighted in bold.

Таблица 21. Коэффициенты корреляции ACC между прогностическими и наблюдаемыми (данные PIOMAS) среднемесячными аномалиями толщины морских льдов в Арктике для разных исходных сроков квазиоперативных прогнозов по моделям INM-CM5 (первые числа в каждой из табличных ячеек) и INM-CM6 (выделенные синим вторые числа в ячейках) в период 2022–2023 гг.

Table 21. Correlation coefficients ACC between forecast and control (PIOMAS data) monthly mean Arctic sea ice thickness anomalies for different initial dates of quasi-operational forecasts with INM-CM5 (first numbers in table cells) and INM-CM6 (second numbers in cells highlighted in blue) models during the period 2022–2023

StartMon (Day0)	Прогностический месяц (LeadMon)					
	1	2	3	4	5	6
2022 г.						
01 (22dec)	0,09/ -0,03	-0,02/ -0,06	-0,24/ -0,13	-0,24/ -0,15	-0,14/	-0,18/
02 (22jan)	0,02/ 0,01	-0,06/ -0,02	-0,06/ -0,03	-0,03/ 0,01	0,07/	-0,08/
03 (22feb)	0,13/ -0,02	0,02/ -0,05	0,05/ -0,01	0,03/ 0,01	-0,12/	-0,17/
04 (22mar)	0,05/ -0,10	0,09/ -0,07	0,06/ -0,11	-0,07/ -0,10	-0,15/	-0,22/
05 (22apr)	0,00/ -0,02	-0,08/ -0,07	-0,17/ -0,09	-0,23/ -0,18	-0,29/	-0,26
06 (22may)	/-0,02	/-0,13	/-0,17	/-0,25		
07 (22jun)	/-0,13	/-0,29	/-0,36	/-0,37		
08 (22jul)	/-0,22	/-0,30	/-0,33	/-0,29		
09 (22aug)	/-0,14	/-0,18	/-0,16	/-0,18		
10 (22sep)	-0,13/ -0,17	-0,20/ -0,15	-0,06/ -0,19	-0,09/ -0,14	-0,18/	-0,16/
11 (22oct)	-0,15/ -0,20	-0,06/ -0,07	-0,07/ -0,03	-0,16/ -0,11	-0,13/	-0,08/
12 (22nov)	-0,02/ -0,09	-0,01/ -0,03	-0,10/ -0,09	-0,10/ -0,07	-0,06/	-0,04/
2023 г.						
01 (22dec)	/-0,01	/-0,08	/-0,07	/-0,08		
02 (22jan)	0,02/ -0,09	0,01/ -0,07	-0,02/ -0,09	-0,07/ -0,09	-0,11/	-0,13/
03 (22feb)	0,10/ 0,08	0,08/ 0,01	0,01/ -0,05	-0,06/ -0,09	-0,09/	-0,17/
04 (22mar)	/0,01	/-0,03	/-0,09	/-0,01		
05 (22apr)	/-0,04	/-0,11	/-0,01	/-0,06		
06 (22may)	/0,01	/0,01	/-0,05	/-0,01		
07 (22jun)	/-0,04	/-0,10	/-0,06	/0,04		
08 (22jul)	/0,13	/0,17	/0,24	/0,16		
09 (22aug)	0,23/0,13	0,15/0,19	0,00/0,07	0,09/0,01		
10 (22sep)	0,27/0,20	0,19/0,18	0,27/0,10			
11 (22oct)	-0,14/ 0,09	-0,05/ 0,07				
12 (22nov)	-0,02/ 0,20					

Примечание. Статистически значимые с вероятностью 95 % значения коэффициентов корреляции (> 0,14 по Z-критерию Фишера) выделены жирным шрифтом. Statistically significant with a probability of 95 % values of correlation coefficients (> 0,14 according to Fisher's Z-criterion) are highlighted in bold.

Заключение

В ходе выполнения проекта ВИПГЗ функционирующая в Гидрометцентре России система усвоения океанографических данных адаптирована для задания начальных условий в прогностических приложениях модели Земной системы ИВМ РАН. Система обеспечивает подготовку диагностической информации о текущем состоянии океана и морских льдов в виде наборов данных, размещаемых на дисковых массивах ЭВМ Cray XC40-LC и пригодных для задания начальных условий в модели Земной системы ИВМ РАН в ее приложениях к сезонным прогнозам на сроки до 6–9 месяцев.

Ретроспективные прогнозы ТПО, составлявшиеся по двум версиям модели Земной системы ИВМ РАН, INM-CM5 и INM-CM6, оказались успешными (значимые коэффициенты корреляции аномалий $ACC > 0,37$) для заблаговременностей до 3 месяцев для Мирового океана и до 4 месяцев для тропической зоны и района Эль-Ниньо. Значения ACC слабо зависели от стартовой даты прогнозов и уменьшались с ростом заблаговременности. Средние для акватории Мирового океана значения ACC для прогнозов по модели INM-CM5 уменьшались от 0,53–0,56 для прогнозов на первый месяц до 0,32–0,37 для прогнозов на четвертый месяц. Наиболее успешными оказались прогнозы по району “Эль-Ниньо-3..4” с ACC 0,73–0,86 для прогнозов на первый месяц и 0,40–0,69 для прогнозов на четвертый месяц. Прогнозы по INM-CM6 систематически обыгрывали прогнозы по INM-CM5 на 0,1–0,3 единиц ACC .

Значения показателя $MSSS$ для ретроспективных прогнозов ТПО в тропической зоне океанов и в районе Эль-Ниньо были преимущественно положительными (0,2–0,5 в тропиках и до 0,8–0,9 в районе Эль-Ниньо), свидетельствуя о преимуществе методических прогнозов в сравнении с прогнозами по климату. Как и для ACC , успешность прогнозов в терминах ACC и $MSSS$ по INM-CM6 была выше в сравнении с INM-CM5.

Среди ретроспективных прогнозов ледовых условий наиболее успешными были прогнозы интегральных характеристик – площади и объема льда в Арктике. В этих прогнозах удовлетворительно воспроизводились многолетние тренды аномалий площади и объема арктических льдов, в значительной степени благодаря заданию начальных условий в виде фактических аномалий, накладываемых на модельный климат. Для антарктических льдов качество воспроизведения площади и объема было ниже.

Степень успешности ретроспективных прогнозов ледовых условий, оцениваемая по показателям ACC и $MSSS$, существенно зависела от начальных сроков прогнозирования. Корреляции аномалий площади арктических льдов получились значимыми для прогнозов на первые 3–5 месяцев с осенними (сентябрь–декабрь) и весенними (март–май) стартовыми датами. По этому показателю наибольший интервал заблаговременностей с успешными прогнозами получился для сентябрьских стартовых дат с наименьшей ледовитостью в момент старта прогноза. Успешными можно считать и прогнозы площади арктических льдов, если их оценивать по показателю

мастерства по отношению к климату *MSSS*. Для объема арктических льдов более успешные по *ACC* и *MSSS* ретроспективные прогнозы получились только для осенних стартовых дат (сентябрь–декабрь).

Средние по Мировому океану оценки *ACC* квазиоперативных прогнозов ТПО по *INM-CM5* ожидаемо снижались с ростом заблаговременности, изменяясь от 0,38–0,61 для первого прогностического месяца до 0,13–0,30 для шестого прогностического месяца. Для тропической зоны (20° ю. ш. – 20° с. ш.) от 0,39–0,81 для первого прогностического месяца до 0,10–0,50 для шестого прогностического месяца. Такие прогнозы можно считать успешными (значимые пространственные *ACC* > 0,27) для заблаговременностей до 4 месяцев для Мирового океана и до 5 месяцев для тропической зоны.

Квазиоперативные прогнозы ледовых условий часто завышали площадь арктических и антарктических льдов. Величина завышения менялась в диапазоне 1–50 %. Оценки *ACC* сплоченности в квазиоперативных прогнозах арктических льдов преимущественно положительные. Для сплоченности антарктических льдов число положительных и отрицательных *ACC* примерно одинаково.

Показатели *ROC* ансамблевых квазиоперативных прогнозов сплоченности льдов в Арктике во всех случаях превышали значение 0,5, что указывает на превосходство методических прогнозов над случайными. Наибольшие значения *ROC* получились для градации «выше нормы» (0,55–0,74), наименьшие – для градации «ниже нормы» (0,50–0,59).

Качество прогнозов ТПО и ледовых характеристик по *INM-CM6* в большинстве случаев превосходило качество прогнозов по *INM-CM5*. Сравнение оценок прогнозов ТПО и ледовых условий с оценками зарубежных центров свидетельствует о том, что оценки качества прогнозов по модели *INM-CM6* сопоставимы с таковыми по зарубежным моделям, тем самым подтверждая соответствие построенной на этой модели прогностической системы мировому уровню.

Рассмотренная в данной статье прогностическая продукция представляется полезной для информационного обслуживания широкого круга потребителей: органов управления и организаций, связанных с морской деятельностью. Высокое качество диагноза и прогноза океанографических полей является также залогом эффективного решения экологических задач, таких как расчет дальнего переноса примесей в океане, оценка последствий аварийных выбросов в морскую среду, проектные оценки воздействий на окружающую среду.

Особую значимость продукция прогностической системы имеет для Арктического региона с развитым ледяным покровом, оказывающим существенное влияние на социально-экономический сектор в этом регионе и на судоходство по Северному морскому пути. Долгосрочные ледовые прогнозы на сезонных масштабах времени необходимы, в частности, для планирования морских операций на российских морях в ледовый период, в первую очередь, для решений по расстановке ледокольного флота.

Представленная в данной статье прогностическая система может стать эффективным инструментом для информационного обеспечения такого рода практических задач.

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д. Усвоение океанографических данных как одна из ключевых задач оперативной океанологии // Гидроакустика. 2023. № 53(1). С. 107-117.
2. Думанская И.О., Зеленько А.А., Мысленков С.А., Нестеров Е.С., Попов С.К., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Морские гидрологические прогнозы и оперативная океанология в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 149-183.
3. Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А. Релаксационный метод усвоения данных по сплоченности морского льда в модели NEMO-LIM3 с несколькими категориями ледяного покрова // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 65-77.
4. Хан В.М., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Субботин А.В., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А. Система сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2024. Информационный сборник № 51. С. 21-36.
5. Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L. SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis // J. Clim. 2018. Vol. 31. P. 6967-6983. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0149.1
6. Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P., Comiso J.C., Zwally H.J. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensor data sets // Journal of Geophysical Research. 1999. Vol. 104, no. C7. P. 15803-15814.
7. Comiso J.C., Bliss A.C., Gersten R., Parkinson C.L., Markus T. Current State of Sea Ice Cover. 2024. <https://earth.gsfc.nasa.gov/cryo/data/current-state-sea-ice-cover>, last access: 08-02-2024.
8. Eyring V., Bony S., Meehl G.A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Dev. 2016. Vol. 9, no. 5. P. 1937-1958.
9. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. The ERA5 global reanalysis // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2020. Vol. 146. P. 1999-2049
10. Huang B., Liu C., Banzon V., Freeman E., Graham G., Hankins B., Smith T., Zhang H.-M. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1 // Journal of Climate. 2021. Vol. 34. P. 2923-2939. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1
11. Murphy A.H. Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient // Monthly Weather Review. 1988. Vol. 116. P. 2417-2424.
12. Schneiger A., Lindsay R., Zhang J., Steele M., Stern H. Uncertainty in modeled Arctic sea ice volume // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. C00D06. DOI: 10.1029/2011JC007084.
13. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS. Vol. I // WMO-No. 485. Geneva, WMO, 2002. 21 p.
14. Volodin E.M., Gritsun A.S. Simulation of Possible Future Climate Changes in the 21st Century in the INM-CM5 Climate Model // Izvestiya. Atmospheric and Ocean Physics. 2020. Vol. 56, no. 3. P. 218-228. DOI: 10.1134/S0001433820030123.
15. Volodin E.M., Mortikov E., Kostykin S.V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // Climate Dynamics. 2017. Vol. 49, no. 11. P. 3715-3734.
16. Vorobyeva V., Volodin E. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2021. Vol. 73, no. 1. P. 1-12.
17. Zhang J., Rothrock D.A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates // Mon. Wea. Rev. 2003. Vol. 131 (5). P. 681-697.

References

1. Vilfand R.M., Zelenko A.A., Resnyanskii Yu.D., Strukov B.S., Tsyruльников M.D. Ocean data assimilation as one of the key tasks of operational oceanology. *Gidroakustika [Hydroacoustics]*, 2023, vol. 53, no. 1, pp. 107–117 [in Russ.].
2. Dumanskaya I.O., Zelenko A.A., Myslenkov S.A., Nesterov E.S., Popov S.K., Resnyanskii Yu.D., Strukov B.S. Marine hydrological forecasts and operational oceanology in the Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no.4, pp. 149-183 [in Russ.].
3. Strukov B.S., Resnyanskii Y.D., Zelenko A.A. Relaxation Method for Assimilation of Sea Ice Concentration Data in the NEMO-LIM3 Multicategory Sea Ice Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 2, pp. 96-104. DOI: 10.3103/S1068373920020053.
4. Khan V.M., Tischenko V.A., Kruglova E.N., Subbotin A.V., Resnyanskii Yu.D., Volodin E.M., Gritsun A.S., Vorob'eva V.V., Tarasevich M.A. Seasonal meteorological forecast system based on the INM-CM5 model. *Rezul'tati ispitaniya novikh i usovershenstvovaniikh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov [Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasting. Information collection]*. Informatsionnyi sbornik No. 51. 2024. pp. 21-36 [in Russ.].
5. Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L. SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis. *J. Clim.*, 2018, vol. 31, pp. 6967-6983. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0149.1
6. Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P., Comiso J.C., Zwally H.J. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensor data sets. *Journal of Geophysical Research*, 1999, vol. 104, no. C7, pp. 15803-15814.
7. Comiso J.C., Bliss A.C., Gersten R., Parkinson C.L., Markus T. Current State of Sea Ice Cover. 2024. Available at: <https://earth.gsfc.nasa.gov/cryo/data/current-state-sea-ice-cover>, last access: 08-02-2024.
8. Eyring V., Bony S., Meehl G.A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 2016, vol. 9, no. 5, pp. 1937-1958.
9. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. The ERA5 global reanalysis. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049
10. Huang B., Liu C., Banzon V., Freeman E., Graham G., Hankins B., Smith T., Zhang H.-M. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. *Journal of Climate*, 2021, vol. 34, pp. 2923-2939. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1
11. Murphy A.H. Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient. *Monthly Weather Review*, 1988, vol. 116, pp. 2417-2424.
12. Schneiger A., Lindsay R., Zhang J., Steele M., Stern H. Uncertainty in modeled Arctic sea ice volume. *J. Geophys. Res.*, 2011, vol. 116, C00D06. DOI: 10.1029/2011JC007084.
13. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS. Vol. I. *WMO-No. 485.*, Geneva, WMO, 2002, 21 p.
14. Volodin E.M., Gritsun A.S. Simulation of Possible Future Climate Changes in the 21st Century in the INM-CM5 Climate Model. *Izvestiya. Atmospheric and Ocean Physics*. 2020, vol. 56, no. 3, pp. 218-228. DOI: 10.1134/S0001433820030123.
15. Volodin E.M., Mortikov E. ., Kostykin S.V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. *Climate Dynamics*, 2017, vol. 49, no. 11, pp. 3715-3734.
16. Vorobyeva V., Volodin E. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2021, vol. 73, no. 1, pp. 1-12.
17. Zhang J., Rothrock D.A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, 2003. vol. 131, no. 5, pp. 681-697.

Поступила 10.11.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024;
принята в печать 10.12.2024.

Submitted 10.11.2024; approved after reviewing 02.12.2024;
accepted for publication 10.12.2024.