

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-67-86>

УДК 551.526.6

## **Прогноз температуры поверхности моря и приземной температуры воздуха по совместной модели океан – атмосфера для региона Белого моря в летний период**

***Н.Ю. Бутаков<sup>1,2</sup>, К.Г. Рубинштейн<sup>1,2</sup>***

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации,  
г. Москва, Россия;*

*<sup>2</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики  
Российской академии наук, г. Москва, Россия  
k.g.rubin@googlegmail.com*

Приведены результаты прогнозов полей гидрометеорологических параметров по совместной модели океан – атмосфера для региона Белого моря за период с 02.06.2015 по 01.09.2015. Совместная модель включала в себя атмосферную WRF-ARW, океаническую ROMS и волновую SWAN модели. Получены оценки качества прогноза температуры поверхности моря и температуры воздуха на 2 м. Систематическое завышение рассчитанных значений температуры поверхности моря относительно данных анализа OISST составляет 0.4 °С. Прогноз температуры воздуха на 2 м в целом был успешнее при использовании совместной модели, чем по модели WRF-ARW, причем улучшение наблюдалось в основном в районах суши, непосредственно прилегающих к Белому морю. Приведены временные интервалы, в которых влияние моря на прогноз температуры воздуха на 2 м было максимальным и минимальным.

*Ключевые слова:* совместная модель океан – атмосфера, Белое море, модели WRF-ARW, ROMS, SWAN

## **Forecasting sea surface temperature and 2 m air temperature with a coupled ocean-atmosphere system for the White Sea region in summer**

***N.Y. Butakov<sup>1,2</sup>, K.G. Rubinstein<sup>1,2</sup>***

*<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia;*

*<sup>2</sup>Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia  
k.g.rubin@googlegmail.com*

The results of forecasting the fields of hydrometeorological parameters with a coupled ocean-atmosphere system for the White Sea region for the period of June 2 – September 1, 2015 are presented. The coupled system included the atmospheric (WRF-ARW), oceanic (ROMS) and wave (SWAN) models. Sea surface temperature (SST) and 2 m air temperature forecast skill scores are obtained. A systematic overestimation of the computed SST values relative to the OISST analysis data is 0.4 °C. The 2 m air temperature forecasts were generally more successful when using the coupled system than when using the WRF-ARW, and the improvement was observed mainly in the land areas

immediately adjacent to the White Sea. Time intervals in which the influence of the sea on the 2 m air temperature forecasts was maximum and minimum are given.

*Keywords:* coupled ocean-atmosphere system, ocean-atmosphere interaction, White Sea, WRF-ARW, ROMS, SWAN

## Введение

Часто численное моделирование (в данной работе в качестве синонимов слову "моделирование" используются также слова "прогноз" и "расчет") состояния атмосферы и океана производится отдельно друг от друга, что не позволяет учитывать динамику обратных связей между ними. Отсутствие учета динамики обратных связей в свою очередь может привести к существенным ошибкам прогноза, поскольку в реальности атмосфера и океан, находясь в непосредственном контакте друг с другом, представляют собой единую термогидродинамическую систему и непрерывно обмениваются внутренней и механической энергией и веществом.

Учет двухсторонних связей между атмосферой и океаном представляет собой важную проблему в науках о Земле. Одним из способов решения этой проблемы является объединение моделей атмосферы и океана в единую систему с использованием "каплера" – специальной программы для обмена гидрометеорологическими характеристиками между компонентами этой системы. Преимуществом реализации объединения моделей в связанную систему при помощи каплера является отсутствие необходимости вносить какие-либо изменения в исходный код моделей.

В последнее время появилось много успешных работ по объединению различных региональных моделей в совместную систему океан – атмосфера. Так, например, в [18] представлена региональная совместная система океан – атмосфера, охватывающая Красное море. Компонентами совместной системы являются океаническая модель MITgcm [15] и атмосферная WRF-ARW [<https://www.mmm.ucar.edu/>]. Связь между компонентами системы осуществлялась при помощи каплера ESMF (Earth System Modeling Framework) [<https://earthsystemmodeling.org/>] и NUOPC (National United Operational Prediction Capability) [<https://earthsystemmodeling.org/>].

В [22] авторы сравнили результаты моделирования температуры воздуха на 2 м, полученные с помощью региональной совместной системы океан – атмосфера COSMO-CLM-NEMO, с моделированием по автономной атмосферной модели COSMO-CLM [<https://www.cosmo-model.org/>] для Северного и Балтийского морей и обнаружили значительное улучшение качества воспроизведения температуры воздуха на 2 м. Связь между компонентами системы при совместном моделировании осуществлялась при помощи каплера OASIS3 (Ocean Atmosphere Sea Ice Soil Simulation Software) [21].

В рамках проекта CONCEPTS (Canadian Operational Network of Coupled Environmental Prediction Systems) [<https://science.gc.ca/>] была

разработана полностью связанная система прогнозирования океан – атмосфера – морской лед для залива Св. Лаврентия [10], которая в оперативном режиме работает в Канадском метеорологическом центре с июня 2011 года. В качестве атмосферного компонента этой системы используется канадская оперативная модель GEM [9], а в качестве океанического – модель океан – лед MoGSL, разработанная в Институте Мориса Ламонтана (IML) [17]. Связь между компонентами совместной системы осуществляется при помощи каплера OASIS3 – Gossip2.

Среди большого числа разработанных в последнее время региональных совместных систем стоит выделить COAWST (Coupled Ocean – Atmosphere – Wave – Sediment Transport) [19], которая представляет собой связанную систему океан – атмосфера – волны. В качестве атмосферного компонента этой системы используется модель WRF-ARW, в качестве океанического компонента модель ROMS (Regional Ocean Modeling System) [<https://www.myroms.org/>], характеристики волн рассчитываются при помощи волновой модели SWAN (Simulating Waves Nearshore) [<https://swanmodel.sourceforge.io/>]. Для реализации совместной работы компонентов системы используется каплер MCT [<https://www.anl.gov/mcs>]. Благодаря широким возможностям в настройке компонентов, данная система хорошо подходит для решения широкого круга задач практически для любого региона Земли. Важным преимуществом моделей, входящих в систему COAWST, является то, что все они свободно распространяются в сети Интернет и имеют открытый исходный код, что позволяет в будущем вносить необходимые изменения в исходный код моделей. Исходя из этих соображений, совместная система COAWST использовалась в данной работе.

Целью данной работы было оценить влияние двухсторонних связей океан – атмосфера на качество прогноза температуры воздуха на 2 м.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Расчет гидрометеорологических параметров по совместной системе океан – атмосфера.

2. Расчет метеорологических параметров по автономной модели WRF-ARW.

3. Расчет статистических критериев для смоделированных по совместной системе океан – атмосфера температуры поверхности моря и температуры воздуха на 2 м.

4. Сравнение качества прогноза температуры воздуха на 2 м по совместной системе океан – атмосфера с качеством прогноза температуры воздуха на 2 м по автономной WRF-ARW.

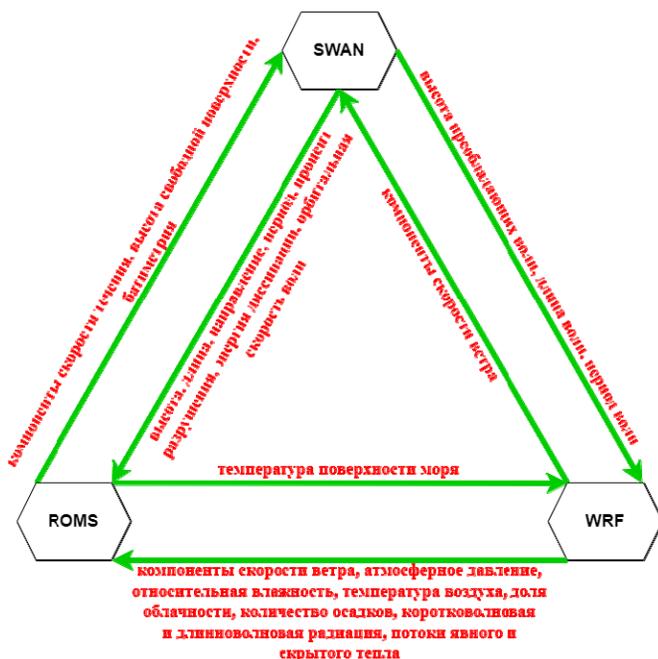
В качестве объекта исследования было выбрано Белое море, поскольку Белое море вместе с прилегающими к нему территориями имеет важное промышленное и транспортное значение в экономике России, поэтому качественный прогноз состояния атмосферы и океана крайне важен

для данного региона. И кроме того, море имеет весьма замкнутую циркуляцию и относительно небольшой размер.

Численному моделированию Белого моря было посвящено множество работ различных авторов, среди которых можно выделить [1, 3, 6, 7]. В [3], например, приведено описание реализации системы оперативного диагноза и прогноза (СОДиП) гидрометеохарактеристик для западных морей российской Арктики (включая Белое море). Расчет атмосферного воздействия в СОДиП осуществлялся при помощи модели WRF-ARW. Расчет гидротермодинамических характеристик, включая поля течений, уровня, температуры и солености воды, толщины и сплоченности морского льда, скорости его дрейфа, осуществлялся по модели INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [2]. Для расчета характеристик ветрового волнения использовалась Российская атмосферно-волновая модель (РАВМ) [5]. В приведенных работах моделирование моря проводилось в автономном режиме, в нашей же работе море и атмосфера рассматриваются как части совместной системы с двухсторонним взаимодействием между компонентами.

## 1. Материалы и методы исследования

Информация об обмене гидрометеорологическими параметрами между компонентами совместной системы COAWST приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Обмен характеристиками между компонентами совместной системы.  
**Fig. 1.** Exchange of characteristics between components of a coupled system.

Ниже дано краткое описание моделей, входящих в систему COAWST, а также каплера, соединяющего все три модели в единую систему.

Модель WRF (Weather Research and Forecasting) – современная мезомасштабная модель численного прогноза погоды, предназначенная как для атмосферных исследований, так и для оперативного прогноза. WRF имеет два динамических ядра (ARW и NMM), систему усвоения данных (WRFDA) и программную архитектуру, поддерживающую параллельные вычисления. Модель служит для широкого круга метеорологических задач в масштабах от десятков метров до тысяч километров. Модель свободно распространяется по Интернету [<https://www.mmm.ucar.edu/>].

ROMS (Regional Ocean Modeling System) – трехмерная модель океана со свободной поверхностью, вертикальными координатами в системе сигма, которые зависят от рельефа дна. Для решения системы уравнений Навье – Стокса в модели используется метод конечных разностей (центральные, чтобы гарантировать сохранение импульса), также используется гидростатическое приближение и приближение Буссинеска. Модель также свободно доступна в Интернете [<https://www.myroms.org/>].

SWAN (Simulating Waves Nearshore) – модель третьего поколения, предназначенная для моделирования в прибрежных районах с малой глубиной и местными течениями. Модель широко используется для численного прогноза волнения в прибрежных районах, эстуариях, каналах и т. д., поскольку она может использовать данные о ветре, батиметрии и течениях, полученные из других моделей. Модель свободно распространяется по Интернету [<https://swanmodel.sourceforge.io/>].

MCT (Model Coupling Toolkit) представляет собой набор инструментов с открытым исходным кодом. Посредством MCT осуществляется обмен данными между моделями и интерполяция данных с сетки на сетку. MCT свободно распространяется по Интернету [<https://www.anl.gov/mcs>].

В табл. 1–3 перечислены конфигурации ROMS, WRF-ARW и SWAN, которые использовались в данной работе.

**Таблица 1.** Конфигурация модели ROMS  
**Table 1.** Configuration of the ROMS model

Размер сетки	214 узлов сетки в долготном направлении, 95 узлов сетки в широтном направлении
Шаг сетки	0.08×0.08°
Количество вертикальных уровней	30
Шаг по времени	10 с
Батиметрия	Сеточные данные по батиметрии GEBCO [ <a href="https://www.gebco.net/">https://www.gebco.net/</a> ] интерполировались в узлы сетки ROMS
Вертикальное турбулентное перемешивание	Схема MYNN 2.5

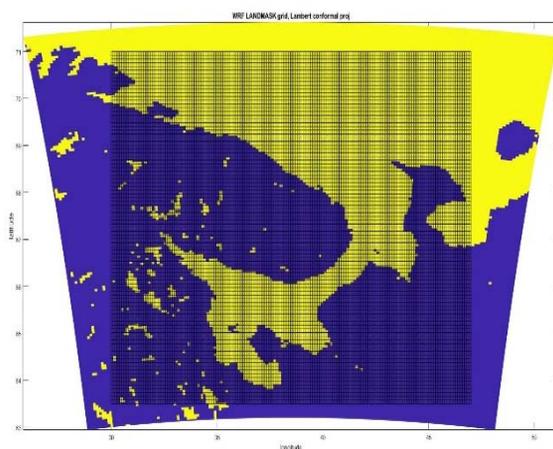
**Таблица 2.** Конфигурация модели WRF-ARW  
**Table 2.** Configuration of the WRF-ARW model

Размер сетки расчетов	167x167 узлов
Шаг сетки	6×6 км
Количество уровней по вертикали	32
Шаг по времени	30 с
Параметризация микрофизики	WSM 6 [11]
Параметризация длинноволновой радиации	RRTMG [12]
Параметризация коротковолновой радиации	RRTMG [12]
Параметризация пограничного слоя	MYNN 2.5 [16]
Параметризация приземного слоя	MYNN 2.5 [16]
Параметризация поверхностного слоя земли	Noah [20]
Параметризация конвекции	Kain–Fritsch [13]

**Таблица 3.** Конфигурация модели SWAN  
**Table 3.** Configuration of the SWAN model

Размер сетки	214 узлов сетки в долготном направлении, 95 узлов сетки в широтном направлении
Шаг сетки	0.08×0.08°
Шаг по времени	180 с
Батиметрия	Сеточные данные по батиметрии GEBCO [ <a href="https://www.gebco.net/">https://www.gebco.net/</a> ]

На рис. 2 представлена расчетная сетка ROMS и SWAN в расчетной области WRF-ARW.

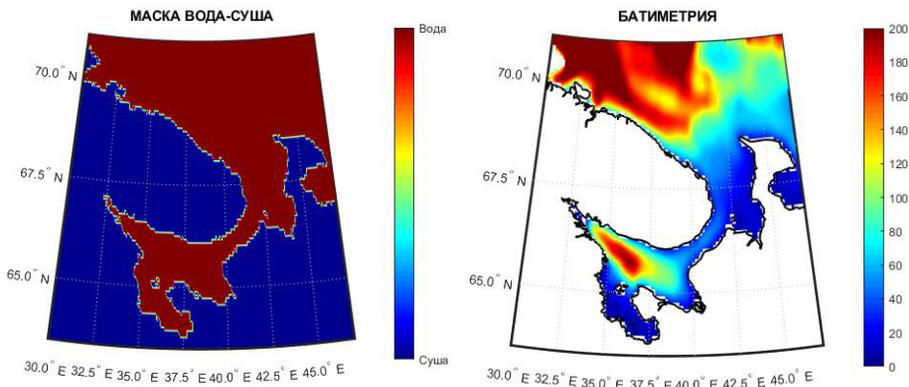


**Рис. 2.** Расчетная сетка модели океана (ROMS) и модели волнения (SWAN) в расчетной области атмосферы (WRF-ARW).

**Fig. 2.** Calculation grid of the ocean model (ROMS) and the wave model (SWAN) in the calculated domain of the atmosphere (WRF-ARW).

Вычислительная сетка для волновой модели SWAN строилась на основе расчетной сетки, построенной для океанической модели ROMS, поэтому эти сетки идентичны. Как видно из рис. 2, открытая граница для моделей ROMS и SWAN существует только на севере и востоке расчетной области. На открытых границах необходимы граничные условия, которые интерполировались в узлы сетки на открытых границах из данных реанализа GOFS 3.1 [<https://www.hycom.org/>] для ROMS и данных ретроспективного прогноза спектра волн по глобальной модели Wave Watch 3 [[https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/multi\\_1/README.txt](https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/multi_1/README.txt)] для SWAN.

На рис. 3 представлены маска вода-суша и батиметрия для модели океана.



**Рис. 3.** Маска вода-суша (слева) и батиметрия (справа).  
**Fig. 3.** Water-land mask (left) and bathymetry (right).

В табл. 4 представлена информация о начальных данных и граничных условиях, которые использовались для расчетов по совместной системе.

Поскольку приливы в Белом море имеют правильный полусуточный характер [4], основной вклад в изменение уровня и скорости течений вносят M2 (лунная полусуточная) и S2 (солнечная полусуточная) составляющие, влияние остальных существенно меньше (рис. 4).

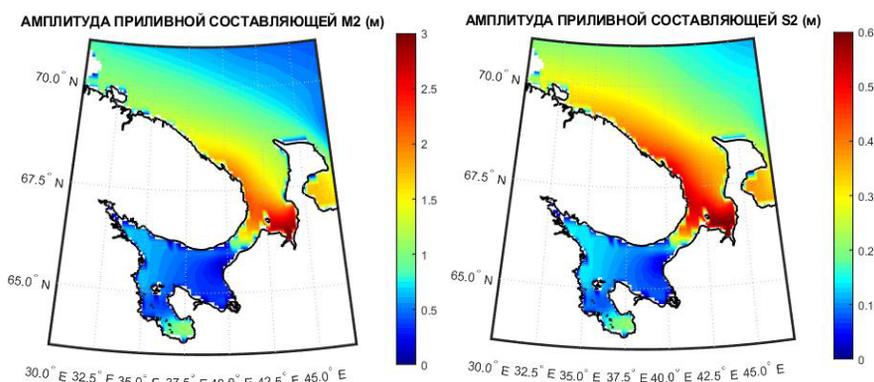
Интервал моделирования был выбран 02.06 – 01.09.2015. Выбор летнего интервала моделирования был обусловлен отсутствием учета в совместной системе характеристик морского льда в данный момент. Расчет характеристик льда планируется производить после добавления модели CICE в совместную систему океан – атмосфера – волны – морской лед.

Поскольку данные по ветровому волнению для Белого моря есть только в очень грубом разрешении, для модели SWAN была применена технология "горячего" старта. То есть для 00 ч ВСВ 01.06.2015 был

произведен запуск совместной системы на 24 часа с начальными условиями для волновой модели, полученными исходя из теоретических предположений. По итогам этого запуска модели были получены спектры волн за 00 ч ВСВ 02.06.2015, которые использовались впоследствии в качестве начальных условий.

**Таблица 4.** Начальные и граничные условия  
**Table 4.** Initial and boundary conditions

Мо- дель	Источник	Разреше- ние	Характеристики
WRF- ARW	Анализ GFS [ <a href="https://www.nco.ncep.noaa.gov/">https://www.nco.ncep.noaa.gov/</a> ]	0.5×0.5°	Стандартные для WRF
ROMS	Реанализ GOFS 3.1 [ <a href="https://www.hycom.org/">https://www.hycom.org/</a> ]	0.04×0.04° севернее 40° с.ш.	Температура (использовалась для вычисления потенциальной температуры для начальных и граничных условий)
			Соленость
			Компоненты скорости течений
			Отклонение уровня моря относительно геоида Земли
	OSU TPXO Tide Models [ <a href="https://www.tpxo.net/">https://www.tpxo.net/</a> ]	0.25×0.25°	13 приливных составляющих (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mф, Mm, M4, Ms4, Mn4)
SWAN	Данные ретроспективного прогноза по модели Wave Watch 3 [ <a href="https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/multi_1/README.txt">https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/multi_1/README.txt</a> ]	0.5×0.5°	Двумерные спектры волн



**Рис. 4.** Амплитуды M2 (слева) и S2 (справа) приливных составляющих.  
**Fig. 4.** Amplitudes of M2 (left) and S2 (right) tidal components.

Моделирование проводилось промежутками:

- 1) 02.06.2015 – 01.07.2015;
- 2) 01.07.2015 – 01.08.2015;
- 3) 01.08.2015 – 01.09.2015.

В конце каждого из промежутков моделирования создавался файл с начальными условиями для последующего "горячего" старта модели SWAN. Граничные условия для модели SWAN ставились каждый час. Начальные и граничные условия для океанической модели ROMS ставились каждый день в 00 ч ВСВ. Начальные условия для модели WRF-ARW ставились 02.06.2015; 01.07.2015; 01.08.2015, граничные условия задавались каждые 6 часов. Таким образом, максимальная заблаговременность прогноза океанических параметров составляла 1 сутки, а атмосферных 31 день. Обмен данными между моделями осуществлялся каждые 30 минут модельного времени.

Для анализа качества прогноза температуры поверхности моря и температуры воздуха на 2 м были рассчитаны следующие статистические критерии:

– систематическая ошибка:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i); \quad (1)$$

– абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(Y_i - \hat{Y}_i)|; \quad (2)$$

– среднеквадратическая ошибка моделирования:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}, \quad (3)$$

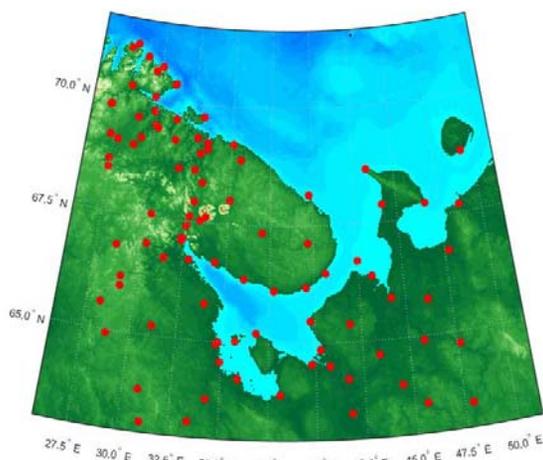
где  $Y_i$  – рассчитанное значение;  $\hat{Y}_i$  – фактическое значение;  $n$  – количество пар рассчитанное значение – наблюдение (анализ).

Чтобы оценить влияние модели океана на качество прогноза температуры воздуха на 2 м при совместном моделировании, был также произведен контрольный запуск автономной WRF-ARW с использованием конфигурации атмосферной модели, аналогичной той, которая использовалась при прогнозе по совместной системе. Температура поверхности моря в случае автономного моделирования бралась из данных анализа GFS (Global Forecast System – Система глобального прогноза, США [<https://www.nco.ncep.noaa.gov/>]). Как и в случае с совместной системой, для автономной модели были также получены оценки качества прогноза температуры воздуха на 2 м.

Для получения оценок качества прогноза температуры поверхности моря использовался анализ OISST [[https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/multi\\_1/README.txt](https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/multi_1/README.txt)] с пространственным разрешением

$0.25 \times 0.25^\circ$ . Данные о температуре поверхности моря из анализа OISST среднесуточные, поэтому для получения оценок качества результаты прогноза температуры поверхности моря также были осреднены за каждые сутки. Результаты прогноза температуры поверхности моря интерполировались в узлы сетки анализа OISST, после чего считались статистические оценки.

Для получения оценок качества прогноза температуры воздуха на 2 м, как в случае расчета по совместной системе, так и в случае расчета по автономной WRF-ARW, использовались данные 8-срочных наблюдений на 103 метеостанциях из базы данных, существующей на вычислительном кластере Гидрометцентра России [<https://meteoinfo.ru/>]. Все статистические критерии для температуры воздуха на 2 м были рассчитаны при помощи пакета инструментов Model Evaluation Tools (MET) [<https://dtcenter.org/>]. На рис. 5 приведена карта с местоположением метеостанций, которые использовались для оценок качества прогноза температуры воздуха на 2 м.



**Рис. 5.** Область моделирования и расположение метеорологических станций, использовавшихся для оценок.

**Fig. 5.** Modeling domain and location of the meteorological stations used for the estimates.

## 2. Анализ результатов прогноза

На высокопроизводительном вычислительном комплексе Cray XC40 [<https://mcc.meteorf.ru/>] был проведен запуск совместной системы океан – атмосфера для трех летних месяцев с 02.06.2015 по 01.09.2015, дискретность выдачи выходных данных атмосферной и океанической моделей составляла 1 час модельного времени. После чего были получены оценки качества прогноза температуры поверхности моря и температуры воздуха на 2 м за весь интервал моделирования.

Оценки качества прогноза температуры поверхности моря были получены на основе 7983 пар анализ – рассчитанное значение. Для получения оценок качества прогноза температуры воздуха на 2 м использовались все метеостанции, расположенные в области моделирования. Общее количество пар наблюдение – рассчитанное значение для температуры воздуха на 2 м составило 65734. Оценивались все заблаговременности.

## 2.1. Температура поверхности моря

В табл. 5 представлены осредненные по времени и пространству оценки качества прогноза температуры поверхности моря.

**Таблица 5.** Оценки качества прогноза температуры поверхности моря  
**Table 5.** Estimates of sea surface temperature forecast quality

Оценки качества прогноза	MEAN	P50	MIN	MAX
BIAS [°C]	0.40	0.44	-0.22	1.23
MAE [°C]	0.61	0.59	0.21	1.49
RMSE [°C]	0.83	0.78	0.35	1.66

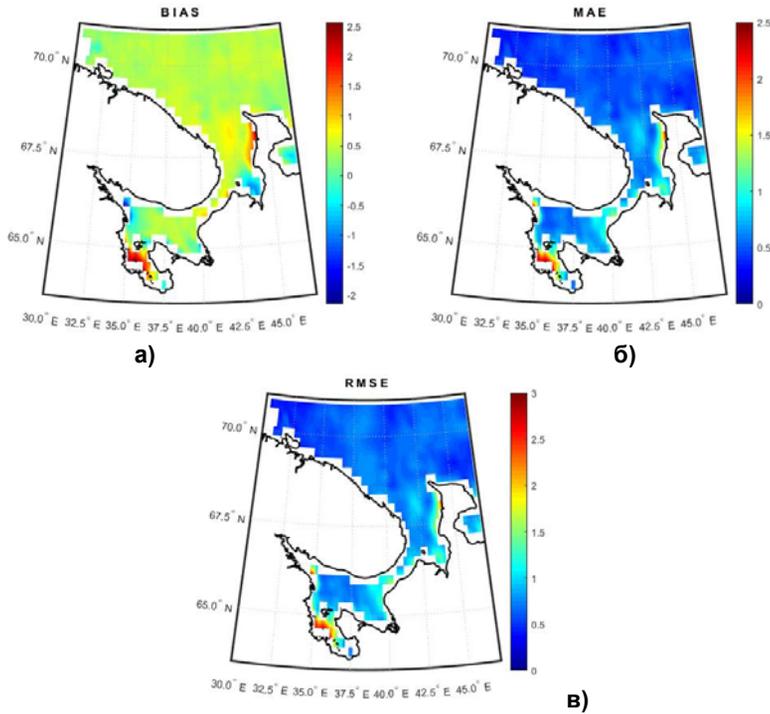
*Примечание.* MEAN – среднее значение ошибки; MIN и MAX – минимальное и максимальное значение ошибки, соответственно; P50 – 50-й процентиль.

Анализируя приведенные в таблице статистические критерии, можно сделать вывод о том, что рассчитанные по модели ROMS значения температуры поверхности моря были систематически завышены относительно данных анализа OISST в среднем на 0.4 °C.

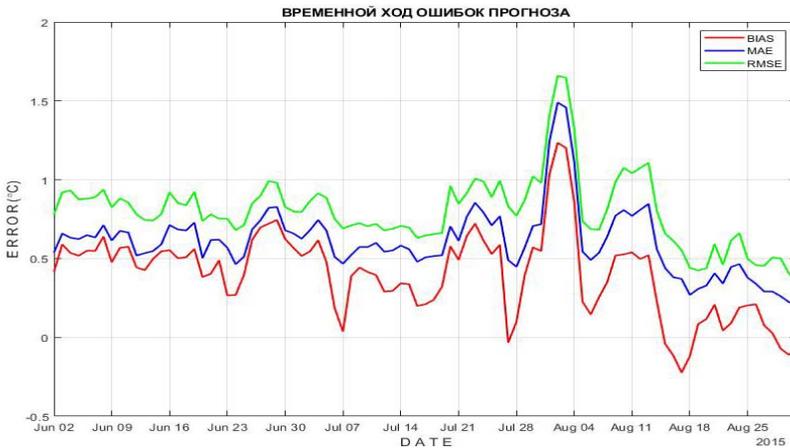
На рис. 6 представлено пространственное распределение систематической, абсолютной и среднеквадратической ошибок прогноза температуры поверхности моря.

Ошибки прогноза температуры поверхности моря были больше у берегов, чем в открытом море. Особенно большие значения ошибки принимали в Онежском заливе и вблизи Канинского берега. В этих районах наблюдалось особенно сильное систематическое завышение рассчитанной температуры поверхности моря.

На рис. 7 представлены графики временного хода ошибок прогноза температуры поверхности моря. Анализируя графики, представленные на рис. 7, можно сделать вывод о том, что почти на протяжении всего периода моделирования наблюдалось систематическое завышение рассчитанной температуры поверхности моря. Максимальных значений ошибки прогноза температуры поверхности моря достигали в начале августа, например, абсолютная ошибка в этот период составляла 1.5 °C.



**Рис. 6.** Систематическая (а), абсолютная (б) и среднеквадратическая (в) ошибки прогноза температуры поверхности моря.  
**Fig. 6.** Systematic (a), absolute (б) and root-mean-square (в) errors of the sea surface temperature forecast.



**Рис. 7.** Графики временного хода осредненных по расчетной области ошибок прогноза температуры поверхности моря.  
**Fig. 7.** Graphs of the time course of the errors in the sea surface temperature forecast averaged over the computational domain.

## 2.2. Температура воздуха на 2 м

В табл. 6–8 представлены осредненные по времени и пространству оценки качества прогноза температуры воздуха на 2 м для случая расчета по совместной системе и автономной модели.

**Таблица 6.** Систематическая ошибка прогноза температуры воздуха на 2 м  
**Table 6.** Systematic error of air temperature at 2 m forecast

	MEAN	MIN	P10	P25	P50	P75	P90	MAX
Совместное	-0.05	-2.04	-0.85	-0.48	-0.09	0.28	0.62	5.32
Автономное	-0.27	-2.28	-1.07	-0.73	-0.33	0.05	0.45	5.08

**Таблица 7.** Абсолютная ошибка прогноза температуры воздуха на 2 м  
**Table 7.** Absolute error of air temperature at 2 m forecast

	MEAN	MIN	P10	P25	P50	P75	P90	MAX
Совместное	1.35	0.57	0.87	1.02	1.21	1.44	1.74	7.25
Автономное	1.42	0.61	0.89	1.06	1.28	1.54	1.86	7.23

**Таблица 8.** Среднеквадратическая ошибка прогноза температуры воздуха на 2 м  
**Table 8.** Root-mean-square error of air temperature at 2 m forecast

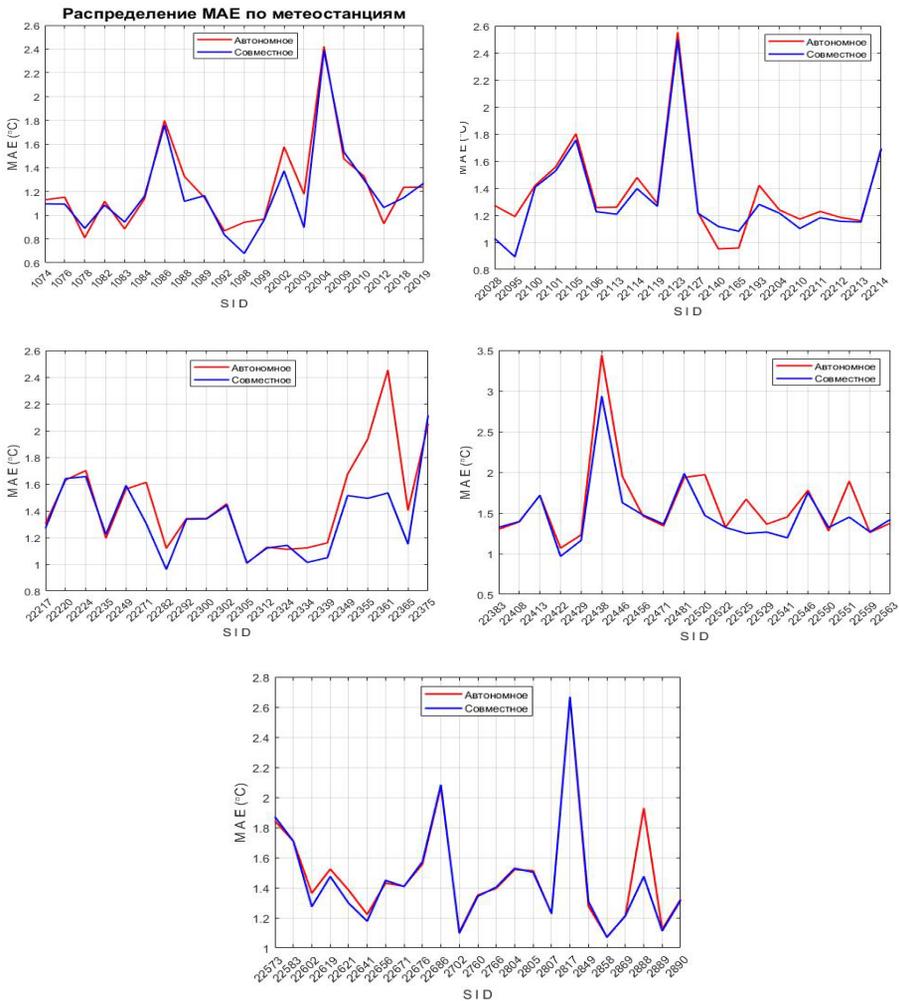
	MEAN	MIN	P10	P25	P50	P75	P90	MAX
Совместное	2.55	0.73	1.12	1.30	1.55	1.83	2.21	34.60
Автономное	2.64	0.77	1.15	1.35	1.64	1.97	2.39	34.62

Анализируя данные, представленные в табл. 6–8, можно сделать вывод о том, что качество совместного моделирования температуры воздуха на 2 м лучше автономного, поскольку средние и медианы ошибок в случае расчета по совместной системе меньше. При автономном моделировании наблюдается систематическая недооценка рассчитанной температуры воздуха на 2 м, в то время как при совместном моделировании эта недооценка практически отсутствует. Наблюдались большие выбросы в значениях ошибок как в случае прогноза температуры воздуха на 2 м по совместной системе, так и в случае прогноза по автономной модели, особенно хорошо это видно на примере ошибки RMSE. Максимальное значение ошибки RMSE больше 34 °С, что очень много, тогда как в 90 % случаев ошибка RMSE не превышала 2.21 °С для совместной системы и 2.39 °С для автономной модели.

На рис. 8 представлена осредненная за весь период абсолютная ошибка прогноза температуры воздуха на 2 м, рассчитанная для каждой метеостанции в отдельности.

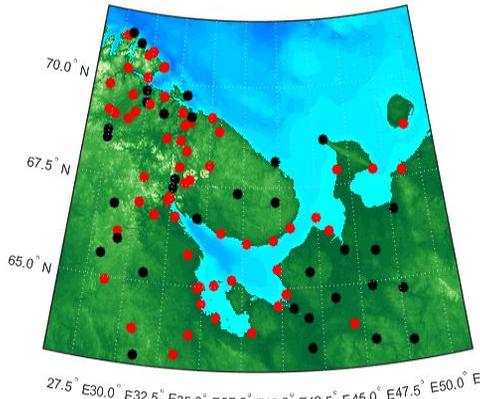
Анализируя данные, представленные на рис. 8, можно сделать вывод о том, что совместная система имеет наибольшее преимущество

над автономной моделью для метеостанции на о. Моржовец, поскольку в этом случае использование океанической и волновой моделей совместно с атмосферной WRF-ARW приводит к уменьшению абсолютной ошибки прогноза температуры воздуха на 2 м почти на 1 °С в среднем за весь интервал моделирования, что достаточно много. Но наблюдались и обратные ситуации, когда автономная модель показывала себя несколько лучше. В этом случае стоит выделить метеостанцию на м. Святой Нос, но в этом случае абсолютная ошибка при автономном моделировании температуры воздуха на 2 м была меньше, чем при совместном моделировании, всего на 0.17 °С.



**Рис. 8.** Абсолютная ошибка прогноза температуры воздуха на 2 м, рассчитанная для каждой метеостанции в отдельности.  
**Fig. 8.** Absolute error of the air temperature at 2 m forecast calculated for each meteorological station separately.

Для лучшего представления о районах расчетной области, в которых использование совместной системы приводит к улучшению качества прогноза температуры воздуха на 2 м, на рис. 9 представлена карта расчетной области с нанесенными на нее метеостанциями. Точки красного цвета соответствуют тем метеостанциям, где прогноз температуры воздуха на 2 м при помощи совместной системы был успешней прогноза по автономной модели, черные точки соответствуют тем метеостанциям, где качество прогноза температуры воздуха на 2 м по автономной модели было лучше.



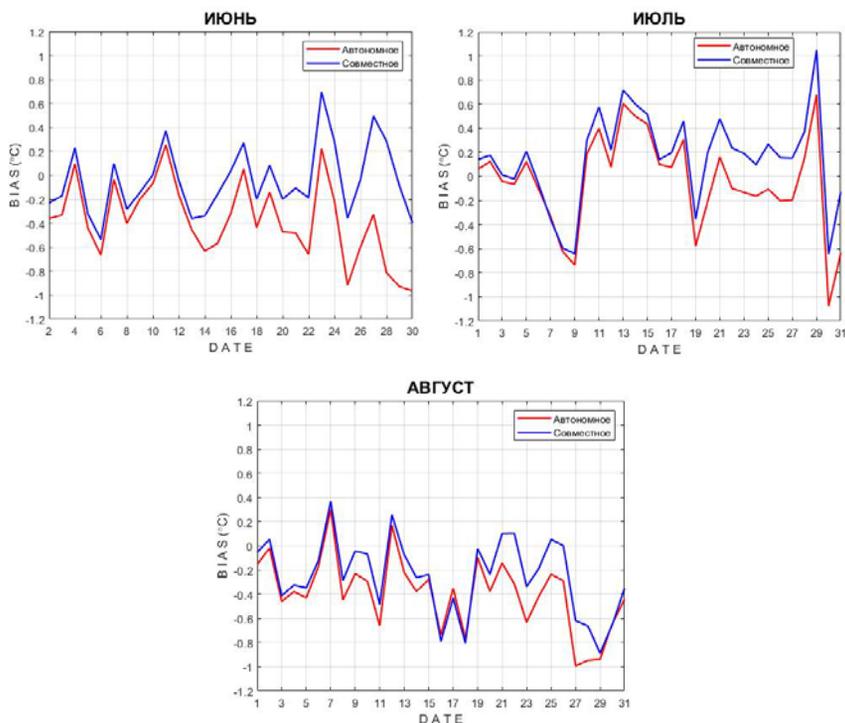
**Рис. 9.** Качество совместного моделирования на станциях: лучше автономного (красным); уступает автономному (черным).  
**Fig. 9.** Quality of coupled modeling at stations: better than offline (red); worse than offline (black).

Как и следовало ожидать, качество прогноза температуры воздуха на 2 м на прибрежных и островных метеостанциях в подавляющем большинстве случаев было успешней при совместном моделировании. На юго-востоке области качество прогноза температуры воздуха на 2 м при помощи совместной системы как правило хуже, чем при использовании автономной модели.

На рис. 10 и рис. 11 представлены графики временного хода осредненной по пространству систематической и абсолютной ошибки прогноза температуры воздуха на 2 м. Ошибки прогноза были осреднены за каждые сутки.

Анализируя графики, приведенные на рис. 10 и рис. 11, можно сделать вывод о большой временной изменчивости ошибок прогноза температуры воздуха на 2 м как в случае совместного моделирования, так и в случае автономного. Величина влияния океанической и волновой моделей на прогноз температуры воздуха на 2 м также сильно меняется во времени. Так, например, с 24 по 30 июля влияние океанической и волновой моделей на прогноз температуры воздуха на 2 м при совместном моделировании приводило к существенному уменьшению ошибок в сравнении

с автономной моделью. В этот промежуток абсолютная ошибка в случае совместного моделирования была меньше абсолютной ошибки автономного моделирования в среднем на  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В данный период наблюдалось сильное занижение рассчитанной по автономной модели температуры воздуха на 2 м, в то время как при совместном моделировании такой сильной недооценки не наблюдалось. С 15 по 19 августа, наоборот, влияние океанической и волновой моделей на качество прогноза температуры воздуха на 2 м почти никак не сказывалось.



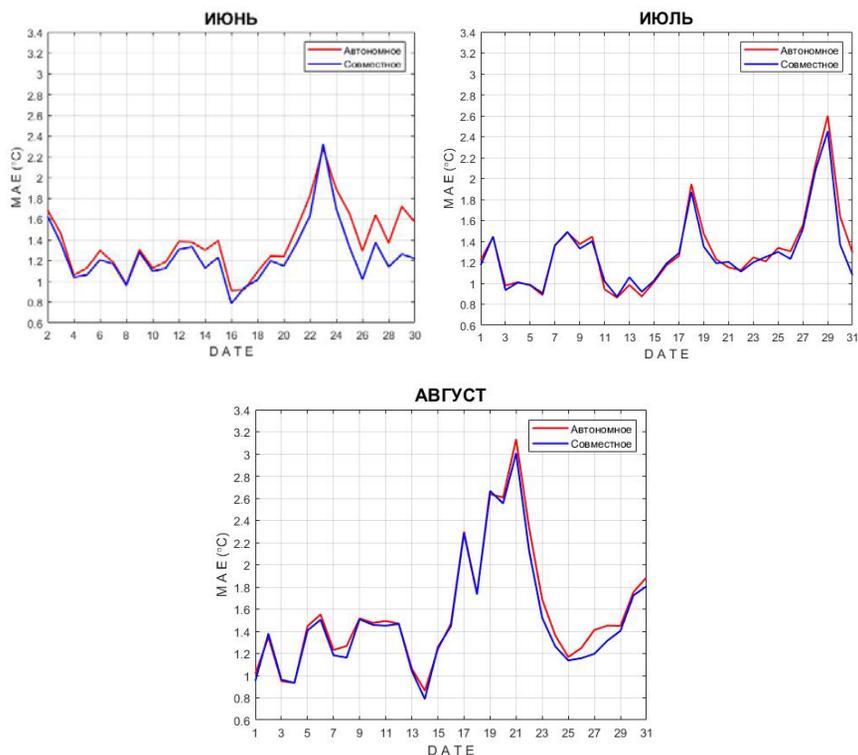
**Рис. 10.** Временной ход систематической ошибки прогноза температуры воздуха на 2 м.

**Fig. 10.** Time course of the systematic error of the air temperature at 2 m forecast.

### Заключение

Подводя итоги проделанной работы, можно сделать следующие выводы.

- Выявлено систематическое завышение рассчитанных значений температуры поверхности моря относительно данных анализа на  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Показано, что ошибки прогноза температуры поверхности моря у берегов принимали сравнительно большие значения, тогда как в открытом море ошибки были значительно меньше.



**Рис. 11.** Временной ход абсолютной ошибки прогноза температуры воздуха на 2 м.

**Fig. 11.** Time course of the absolute error of the air temperature at 2 m forecast.

- Можно констатировать, что прогноз температуры воздуха на 2 м в целом был успешней при использовании совместной системы.
- Можно отметить, что улучшение качества прогноза температуры воздуха на 2 м при использовании совместной системы наблюдалось главным образом в районах расчетной области, непосредственно прилегающих к Белому морю.
- Как в случае использования совместной системы, так и в случае использования автономной модели наблюдалась большая пространственно-временная неоднородность распределения ошибок прогноза температуры воздуха на 2 м.
- Выделены временные интервалы заметного влияния океанической модели на качество прогноза температуры воздуха на 2 м и интервалы, в которых влияние океанической модели сводилось к минимуму.

## Список литературы

1. Архипкин В. С., Добролюбов С. А., Мысленков С. А., Кораблина А. Д. Волновой климат Белого моря // Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики / Под ред. С. А. Сократов. Т. 1. М.: Лига-Вент, 2015. С. 48-58.
2. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
3. Дианский Н.А., Кабатченко И.М., Фомин В.В., Панасенкова И.И., Резников М.В. Система диагноза и прогноза термогидродинамических характеристик и ветрового волнения в западных морях российской Арктики и расчет параметров экстремального шторма 1975 г. в Баренцевом море с учетом ледовых условий // Вести газовой науки. 2018. № 4 (36). С. 156-165.
4. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
5. Кабатченко И.М., Матушевский Г.В., Резников М.В., Заславский М.М. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 61-71.
6. Кораблина А.Д., Архипкин В.С., Самборский Т.В. Особенности формирования штормовых нагонов в динамической системе Белое море – устьевая область р. Северная Двина по результатам численного моделирования // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2016. № 1. С.78-86.
7. Чернов И.А., Толстиков А.В. О численном моделировании Белого моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 7. С. 16-26.
8. Bryan K., Manabe S., Pacanowski R.C. A global ocean-atmosphere climate model. Part II. The oceanic circulation // J. Phys. Oceanogr. 1975. Vol. 5, no. 1. P. 30-46.
9. Coté J., Gravel S., Methot A., Patoine A., Roch M., Staniford A. The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model, Part I: design considerations and formulation // Mon. Wea. Rev. 1998. Vol. 126. P. 1373-1395.
10. Faucher M., Roy F., Desjardins S., Fogarty C., Pellerin P., Ritchie H., Denis B. Operational coupled atmosphere – ocean – ice forecast system for the Gulf of St. Lawrence, Canada // 9th EMS Annual Meeting, Toulouse, France, 28 September–2 October 2009, EMS2009-274, 2009.
11. Hong S.-Y., Lim J.-O.J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) // J. Korean Meteor. Soc. 2006. Vol. 42. P. 129-151.
12. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. D13103.
13. Kain John S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update // J. Appl. Meteor. 2004. Vol. 43. P. 170-181.
14. Manabe S., Bryan K. Climate Calculations with a Combined Ocean-atmosphere Model // J. Atmos. Sci. 1969. Vol. 26. P. 786-789.
15. Marshall J., Hill C., Perelman L., Adcroft A. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling // J. Geophys. Res. Oceans. 1997. Vol. 102. P. 5733-5752.
16. Nakanishi M., Niino H. An improved Mellor-Yamada level 3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advecting fog // Bound. Layer Meteor. 2006. Vol. 119. P. 397-407.

17. Saucier F.J., Roy F., Gilbert D., Pellerin P., Ritchie H. Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada // *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2003. Vol. 108, no. C8. P. 3269.

18. Sun R., Subramanian A.C., Miller A.J., Mazloff M.R., Hoteit I., Cornuelle B.D. SKRIPS v1.0: a regional coupled ocean-atmosphere modeling framework (MITgcm-WRF) using ESMF/NUOPC, description and preliminary results for the Red Sea // *Geosci. Model Dev.* 2019. Vol. 12. P. 4221-4244.

19. Sutil U., Pezzi L. COAWST User's Guide – Third Edition. 2020.

20. Tewari M., Chen F., Wang W., Dudhia J., LeMone M.A., Mitchell K., Ek M., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model // 20th conference on weather analysis and forecasting / 16th conference on numerical weather prediction, 2004. P. 11-15.

21. Valcke S. OASIS3 User Guide (prism 2-5) CERFACS Tech. Rep. TR/CMGC/06/73, PRISM Rep. No. 3. Toulouse, 2006. P. 60.

22. Van Pham T., Brauch J., Dieterich C., Frueh B., Ahrens B. New coupled atmosphere-ocean-ice system COSMO-CLM/NEMO: assessing air temperature sensitivity over the North and Baltic Seas // *Oceanologia*, 2014. Vol. 56. P. 167-189.

## References

1. Arkhipkin V.S., Dobroliubov S.A., Myslenkov S.A., Korablina A.D. The waves climate of the White sea. *Changing Climate and Socio-Economic Potential of the Russian Arctic*. Sokratov S.A. (Ed.), 2015, vol. 1, pp. 48-58 [in Russ.].

2. Dianskij N.A. Modelirovanie cirkuljacii okeana i issledovanie ego reakcii na korotkoperiodnye i dolgoperiodnye atmosferye vozdejstvija [Ocean circulation modelling and investigation of its response to short- and long-period atmospheric forcing]. Moscow: PhysMathLit publ., 2013. 272 p. [in Russ.].

3. Diansky N.A., Kabatchenko I.M., Fomin V.V., Panasenkova I.I., Reznikov M.V. A Marine and atmospheric research system for simulating hydrometeorological characteristics and wind waves in the western seas of Russian Arctic, and simulation of the extreme storm of 1975 in Barents sea with ice conditions. *Vesti gazovoy nauki*, 2018, vol. 36, no. 4, pp. 156-165 [in Russ.].

4. Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. Morya SSSR [Seas of the USSR]. Moscow: MSU publ., 1982, 192 p. [in Russ.].

5. Kabatchenko I.M., Matushevskii G.V., Reznikov M.V., Zaslavskii M.M. Numerical modelling of wind and waves in a secondary cyclone at the Black Sea. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2001, no. 5, pp. 45-53 [in Russ.].

6. Korablina A.D., Arkhipkin V.S., Samborski T.V. Modeling features formation storm surge in a dynamic system white sea – mouth area northern dvina river. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography], 2016, vol. 1, pp. 78-86 [in Russ.].

7. Chernov I.A., Tolstikov A.V. Numerical simulation of the White sea. *Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN № 7* [Proceedings of the Karelian Research Center of the RAS № 7], 2021, pp. 16-26 [in Russ.].

8. Bryan K., Manabe S., Pacanowski, R.C., A global ocean-atmosphere climate model. Part II. The oceanic circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, 1975, vol. 5, no. 1, pp. 30-46.

9. Coté J., Gravel S., Methot A., Patoine A., Roch M., Staniford A. The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model, Part I: design considerations and formulation. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, vol. 126, pp. 1373-1395.
10. Faucher M., Roy F., Desjardins S., Fogarty C., Pellerin P., Ritchie H., Denis B. Operational coupled atmosphere – ocean – ice forecast system for the Gulf of St. Lawrence, Canada. 9th EMS Annual Meeting, Toulouse, France, 28 September – 2 October 2009, EMS2009-274, 2009.
11. Hong S.-Y., Lim J.-O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, 2006, vol. 42, pp. 129-151.
12. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, D13103.
13. Kain John S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 2004, vol. 43, pp. 170-181.
14. Manabe S., Bryan K. Climate Calculations with a Combined Ocean-atmosphere Model. *J. Atmos. Sci.*, 1969, vol. 26, pp. 786-789.
15. Marshall J., Hill C., Perelman L., Adcroft A. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. *J. Geophys. Res. Oceans.*, 1997, vol. 102, pp. 5733-5752.
16. Nakanishi M., Niino H. An improved Mellor–Yamada level 3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advecting fog. *Bound. Layer Meteor.*, 2006, vol. 119, pp. 397-407.
17. Saucier F.J., Roy F., Gilbert D., Pellerin P., Ritchie H. Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, vol. 108, no. C8, 3269 p.
18. Sun R., Subramanian A.C., Miller A.J., Mazloff M.R., Hoteit I., Cornuelle B.D. SKRIPS v1.0: a regional coupled ocean–atmosphere modeling framework (MITgcm–WRF) using ESMF/NUOPC, description and preliminary results for the Red Sea. *Geosci. Model Dev.*, 2019, vol. 12, pp. 4221-4244.
19. Sutil U., Pezzi L. COAWST User's Guide – Third Edition. 2020.
20. Tewari M., Chen F., Wang W., Dudhia J., LeMone M.A., Mitchell K., Ek M., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. *20th conference on weather analysis and forecasting / 16th conference on numerical weather prediction*, 2004, pp. 11-15.
21. Valcke S. OASIS3 User Guide (prism 2-5) CERFACS Tech. Rep. TR/CMGC/06/73, PRISM Rep. No 3, Toulouse, 2006, pp. 60.
22. Van Pham T., Brauch J., Dieterich C., Frueh B., Ahrens B. New coupled atmosphere-ocean-ice system COSMO-CLM/NEMO: assessing air temperature sensitivity over the North and Baltic Seas. *Oceanologia*, 2014, vol. 56, pp. 167-189.

Поступила 10.10.2022; одобрена после рецензирования 16.03.2023;  
принята в печать 31.03.2023.

Submitted 10.10.2022; approved after reviewing 16.03.2023;  
accepted for publication 31.03.2023.