

## Оценка качества моделирования скорости ветра и высоты волн в Карском море с использованием моделей *COSMO-CLM* и *WAVEWATCH III*

С. А. Мысленков<sup>1, 2, 3</sup>✉, В. С. Платонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия  
✉ stasocean@gmail.com

Поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена после рецензирования 03.10.2022;  
принята к публикации 08.11.2022.

### Аннотация

**Цель.** Цель работы – получить оценки качества результатов моделирования скорости ветра и высоты волн в Карском море.

**Методы и результаты.** Метеорологические характеристики получены при помощи модели *COSMO-CLM*, а волновые параметры – на основе модели *WAVEWATCH III* с высоким разрешением в прибрежной зоне. Проведено восемь численных экспериментов с разными настройками и различным шагом по пространству атмосферной модели от 2,8 до 12 км. Эксперименты выполнены для периодов сентябрь – октябрь 2012 г. и август – сентябрь 2014 г. Для оценки качества моделирования скорости ветра и высоты волн использовались данные спутников *CryoSat* и *SARAL*, а также данные прибрежных метеостанций. Получены статистические показатели оценки качества воспроизведения ветра и волн для разных конфигураций моделей. При оценке скорости ветра наилучший результат обеспечивает конфигурация модели *COSMO-CLM* с разрешением на базовой области ~ 12 км, на вложенной ~ 3 км с использованием технологии «спектральной подкачки». Верификация по данным метеостанций и спутниковых измерений для оптимальной конфигурации показала, что для скорости ветра коэффициенты корреляции составляют в среднем ~ 0,8, систематическая ошибка – 0,1–0,4 м/с, среднеквадратическая ошибка – 1,7–1,8 м/с. При оценке высоты волн наилучший результат получен при использовании полей ветра с разрешением 3 и 10 км (среднеквадратическая ошибка ~ 0,4 м, коэффициент корреляции ~ 0,87). **Выводы.** Показано, что использование технологии «спектральной подкачки» улучшает качество воспроизведения модуля скорости ветра и высоты волн системой *COSMO-CLM* – *WW3* для региона Карского моря во всех случаях. Качество результатов воспроизведения поля ветра при использовании модели *COSMO-CLM* разрешением ~ 3 км сопоставимо с качеством реанализов *ERA5* и *CFSv2*. Поскольку мезомасштабное моделирование позволяет воспроизводить более детальную структуру поля ветра, в особенности в прибрежных районах, результаты позволяют использовать поля ветра с разрешением 3 км для широкого круга научных и прикладных задач.

**Ключевые слова:** Карское море, скорость ветра, ветровое волнение, *WAVEWATCH III*, нерегулярная сетка, *COSMO-CLM*, моделирование

**Благодарности:** работа С. А. Мысленкова выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Расчеты метеорологических параметров по модели

© Мысленков С. А., Платонов В. С., 2023

*COSMO-CLM* выполнены В. С. Платоновым в рамках выполнения госзадания МГУ имени М. В. Ломоносова (тема № 121051400081-7) с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова.

**Для цитирования:** Мысленков С. А., Платонов В. С. Оценка качества моделирования скорости ветра и высоты волн в Карском море с использованием моделей COSMO-CLM и WAVEWATCH III // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 1. С. 84–105. EDN PMNYHY. doi:10.29039/0233-7584-2023-1-84-105

## Evaluation of the Wind Speed and Wave Heights Simulation in the Kara Sea Using the COSMO-CLM and WAVEWATCH III Models

S. A. Myslenkov<sup>1, 2, 3</sup>✉, V. S. Platonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
✉ stasocean@gmail.com

### Abstract

**Purpose.** The work is aimed to obtain the quality estimates of the results of modeling the wind speed and wave heights in the Kara Sea.

**Methods and Results.** The COSMO-CLM model was used to simulate the atmospheric conditions, and the WAVEWATCH III model – to obtain the wave parameters with high resolution in the coastal zone. Eight COSMO-CLM-based numerical experiments including various model options and grid sizes from 12 to 2.8 km were carried out for the periods September – October, 2012 and August – September, 2014. To assess the quality of wind speed and wave height modeling, the data of the CryoSat and SARAL satellites, as well as the coastal weather stations were used. Statistical indicators for assessing the quality of wind and wave reproduction for different model configurations were obtained. The wind speed assessing was best provided by the COSMO-CLM model configuration with the ~ 12 km resolution in the basic domain and the ~ 3 km resolution in the nested one; at that in both cases the “spectral nudging” technology was used. Verification using the weather stations data and the satellite measurements performed for the model optimal configuration, has shown that for the wind speed, the average correlation coefficients were ~ 0.8, the bias varied from 0.1 to 0.4 m/s and the RMS error was 1.7–1.8 m/s. As for the wave height assessments, the best result was obtained when the wind fields with the 3 and 10 km resolutions were applied (the RMS error was ~ 0.4 m and the correlation coefficient was ~ 0.87).

**Conclusions.** It is shown that in all the cases, application of the “spectral nudging” technology improves quality of the wind speed and wave height modeling performed due to the COSMO-CLM – WW3 system for the Kara Sea region. Quality of the results of wind field reproduction using the COSMO-CLM model with the ~ 3 km resolution is comparable to quality of the ERA5 and CFSv2 reanalyses. Since mesoscale modeling provides a more detailed wind field spatial structure, especially in the coastal regions, the results permit to use the wind fields with the 3 km resolution for a wide range of scientific and applied tasks.

**Keywords:** Kara Sea, wind speed, wind waves, WAVEWATCH III, unstructured mesh, COSMO-CLM, simulation

**Acknowledgements:** The work by S. A. Myslenkov was carried out with support by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes”. The meteorological parameters were calculated by V. S. Platonov using the COSMO-CLM model within the framework of the MSU state assignment on theme No. 121051400081-7 using the equipment of the shared research facilities of HPC computing resources of the Lomonosov Moscow State University.

## Введение

В настоящее время существует повышенный интерес к исследованию гидрометеорологических условий арктических морей, связанный с интенсивным хозяйственным освоением данного региона: здесь идет активная разведка, добыча и транспортировка полезных ископаемых, развивается рыбный промысел и судоходство. Одним из ключевых лимитирующих факторов для хозяйственной деятельности и судоходства, для развития береговой инфраструктуры, подверженной разрушениям в штормовых условиях, является ветро-волновой режим. Изучение гидрометеорологических условий в арктических морях России – приоритетная задача в связи с освоением шельфовых месторождений нефти и газа, развитием и обеспечением судоходства по Северному морскому пути и сопутствующей инфраструктуры.

Для обеспечения гидрометеорологического обслуживания важное значение имеет исследование повторяемости экстремальных ветров и волн, их межгодовой изменчивости, а также причин, приводящих к их возникновению. Натурные данные о волнении в Арктике практически отсутствуют, поэтому для обеспечения судоходства и шельфовых работ используются диагностические и прогностические расчеты численных моделей волнения. В качестве вынуждающей силы (форсинга) в этих моделях используются диагностические или прогностические поля ветра из глобальных моделей прогноза погоды [1–3]. Отметим, что арктические моря отличаются также низкой обеспеченностью метеорологическими наблюдениями [4], поэтому численные модели атмосферы часто представляют собой единственный источник данных о скорости ветра. В современных метеорологических реанализах производится усвоение данных о приводном ветре, полученных со спутниковых альтиметров [5, 6]. Усвоение данных альтиметров реанализами несколько затрудняет использование спутниковых данных для оценки качества реанализов, так как эти данные уже не являются независимыми. Среднеквадратическая ошибка (СКО) для скорости ветра по данным со спутника *SARAL* при сопоставлении с данными метеорологических буев составляет 1,5 м/с [7], а для спутника *CryoSat* стандартное отклонение составляет 1,2–1,3 м/с [8]. Для воспроизведения ветрового режима акваторий со сложной береговой линией представляется целесообразным использовать региональные модели с высоким пространственным разрешением.

Существует ряд работ, посвященных исследованию ветро-волнового режима Карского моря. Особенности ветрового режима и волнового климата Карского моря приведены в справочнике <sup>1</sup>, в котором на основе реанализа *NCEP/NCAR* и модели *WAVEWATCH III (WW3)* рассчитана повторяемость ветра и волн различной обеспеченности, в частности показано, что в Ямало-Югорском районе Карского моря скорость ветра (осреднение 10 мин) с повторяемостью 1 раз в год составляет 22,5 м/с, высота волн 50%-ной обеспе-

---

<sup>1</sup> Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева и Карского морей. СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2013. 334 с.

ченности с повторяемостью 1 раз в год – более 3 м, а 0,1%-ной обеспеченности – более 8,6 м. С октября по апрель средняя длительность окон погоды, когда скорость ветра не превышает 10 м/с, составляет не более 3 дней. То есть значительную часть года в Карском море господствует штормовая погода, в связи с чем чрезвычайно важно развить методы точного диагноза и прогноза ветра и волнения. В [9] на основе моделирования волнения показан рост штормовой активности в Карском море за последние 39 лет, обусловленный в первую очередь увеличением продолжительности безледного периода и увеличением разгона вследствие меньшей площади льдов. В работе [1] на основе модели *SWAN* и вложенных сеток проведено моделирование волнения в Карском море и Обской губе. Сведения о параметрах волнения и трендах высоты волн приводятся также в статьях [10, 11].

В работе [2] расчет поля ветра выполнен по модели *WRF*, а параметры волнения для Карского и Печорского морей моделируются при помощи Российской атмосферно-волновой модели. Оценки точности расчетов скорости ветра при сравнении с данными метеостанций показали корреляцию 0,8–0,9, что подтверждает положительный эффект от применения ветрового форсинга мезомасштабных моделей с высоким пространственным разрешением. Оперативные прогнозы параметров ветровых волн в Карском море доступны на сайте Арктического и антарктического научно-исследовательского института (URL: [http://old.aari.ru/clgmi/forecast/\\_fc\\_1.php](http://old.aari.ru/clgmi/forecast/_fc_1.php)).

Однако важно анализировать качество мезомасштабных метеорологических моделей, принимая во внимание возможность воспроизведения ими опасных явлений в рассматриваемом регионе, например таких, как подветренные бури или полярные мезоциклоны [12, 13], которые вносят ощутимый вклад в общую повторяемость штормов. В работе [12] представлено успешное воспроизведение при помощи модели *WRF* Новоземельской боры и ее влияние на ветровое волнение. В работе [14] на отдельных примерах показано, что моделирование *COSMO-CLM* с высоким разрешением (~3 км) в Арктическом регионе со сложными береговой линией и рельефом позволяет адекватно описывать мезомасштабные циркуляции, в том числе связанные с высокими скоростями ветра. В работе [15] продемонстрировано успешное использование модели *COSMO-CLM* с разрешением ~ 3 км для прибрежной зоны Карского моря.

В этой работе в качестве ветрового форсинга использованы результаты восьми оригинальных численных экспериментов на базе модели *COSMO-CLM*. На основе данных измерений получены оценки качества результатов моделирования скорости ветра и параметров волн. Цель работы – показать целесообразность применения мезомасштабных моделей для анализа и прогноза штормовых условий в Карском море. В работе представлены ретроспективные расчеты приводного ветра и ветрового волнения с высоким пространственным разрешением.

### Материалы и методы исследований

**Мезомасштабная модель *COSMO-CLM*.** В качестве основного инструмента моделирования динамики атмосферы использовалась негидростатическая модель *COSMO-CLM* (версия 5.0) [16, 17]. *COSMO-CLM* – климатическая

версия региональной мезомасштабной модели *COSMO*, разрабатываемая одноименным консорциумом (*Consortium for Small-scale Modeling*), включающим национальные службы прогноза погоды ряда стран, в том числе РФ (Росгидромет). Климатическая версия модели развивается в рамках международного научного сообщества *CLM-Community* <sup>2</sup>.

Модель *COSMO-CLM (CCLM)* основана на уравнениях Рейнольдса, описывающих динамику сжимаемой жидкости во влажной атмосфере [18, 19]. Модельные уравнения решаются на широтно-долготной сетке ( $\lambda$ ,  $\varphi$ ) со смещенным положением Северного полюса, в роли вертикальной координаты выступает гибридная величина  $\mu$  ( $\sigma$ - $z$ -система), численная схема реализована на сетке Аракавы типа *C* [20]. Внешние параметры, описывающие свойства поверхности, агрегируются с помощью инструмента *EXTPAR* <sup>3</sup> из различных источников: *GLOBE* (поверхностная орография), *MODIS* (свойства почвы и альбедо) и *Globcover2009* (растительный покров, глубина корней, доля суши и др.), – и в ходе препроцессинга переинтерполируются на сетку модели *COSMO*.

Во многих работах [21, 22] было показано, что использование технологии «спектральной подкачки» (англ. *spectral nudging*) способствует лучшему усвоению особенностей крупномасштабных метеорологических полей за счет дополнительного использования данных форсинга (в данном случае реанализа) не только на боковых границах расчетной области, но и внутри нее. Поэтому в данной работе был проведен ряд экспериментов по исследованию влияния использования «спектральной подкачки» на качество воспроизведения приземного ветра и волнения.

Более подробное описание физики и динамики модели и параметризаций подсеточных процессов можно найти на странице документации модели <sup>4</sup>.

Региональная модель *COSMO-CLM* используется членами консорциума для решения широкого спектра задач, в том числе для моделирования динамики атмосферы и ветрового режима в высоких широтах. Первые результаты воспроизведения случаев штормового волнения в арктических морях с использованием модели *COSMO-CLM*, совмещенной с волновой моделью, приведены в статьях [15, 23].

**Модель *WAVEWATCH III*.** Для расчета параметров ветрового волнения в Карском море использовалась спектральная волновая модель третьего поколения *WAVEWATCH III* версии 6.07 <sup>5</sup>. Эта волновая модель учитывает нелинейные взаимодействия трех волн, характерные для закрытых и мелководных акваторий, эффекты обрушения и дифракции волн на малых глубинах, а также влияние морского льда.

---

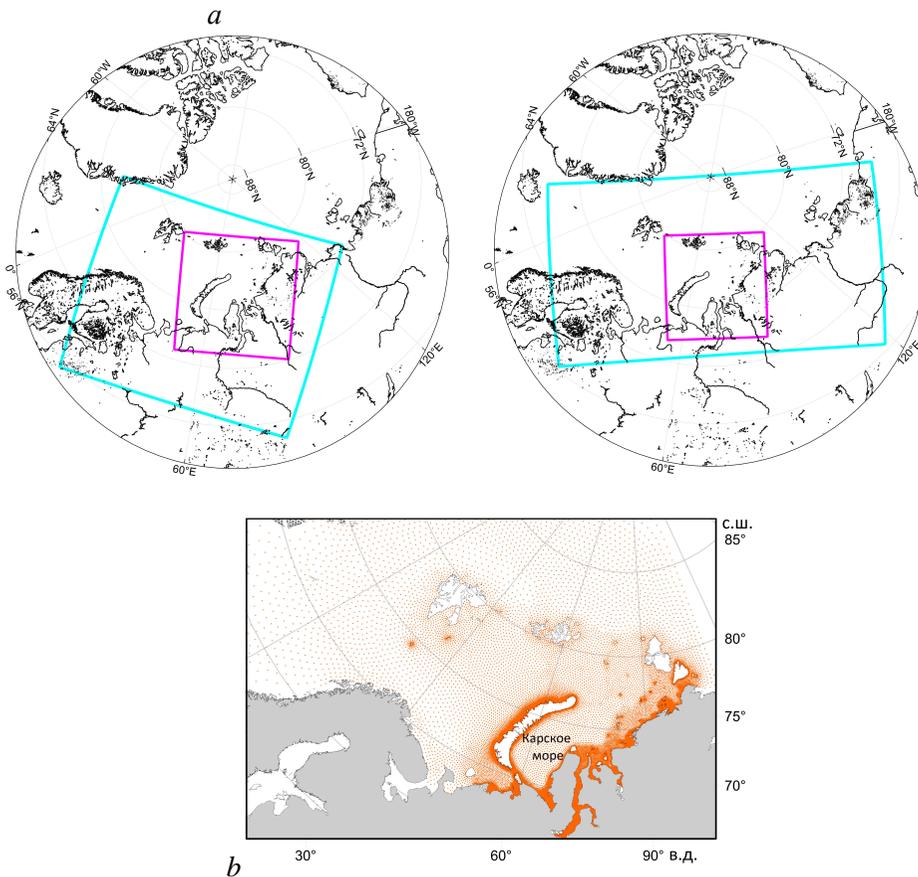
<sup>2</sup> URL: <https://clmcom.scrollhelp.site/clm-community/> (дата обращения: 24.06.2022).

<sup>3</sup> External Parameters for Numerical Weather Prediction and Climate Application *EXTPAR* v5\_0. User and Implementation Guide / H. Asensio [et al.]. 2018. 45 p. URL: [https://www.cosmo-model.org/content/support/software/ethz/EXTPAR\\_user\\_and\\_implementation\\_manual\\_202003.pdf](https://www.cosmo-model.org/content/support/software/ethz/EXTPAR_user_and_implementation_manual_202003.pdf) (date of access: 20.12.2022).

<sup>4</sup> URL: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm> (дата обращения: 24.06.2022).

<sup>5</sup> User Manual and System Documentation of *WAVEWATCH III* version 6.07. College Park, USA, 2019. URL: [https://www.researchgate.net/publication/336069899\\_User\\_manual\\_and\\_system\\_documentation\\_of\\_WAVEWATCH\\_III\\_R\\_version\\_607](https://www.researchgate.net/publication/336069899_User_manual_and_system_documentation_of_WAVEWATCH_III_R_version_607) (date of access: 18.12.2020).

Для генерации волн применялась схема *ST6*, для расчета нелинейных взаимодействий – схема *DIA*, для учета влияния льда – схема *IC0*. Учет воздействия придонного трения происходит по схеме *JONSWAP*, диссипация волновой энергии параметризуется в зависимости от отношения фазовой и групповой скоростей волн, а также глубины в точке. Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений ( $\Delta\theta = 10^\circ$ ), частотный диапазон  $\sigma$  – 36 интервалов от 0,03 до 0,843 Гц. Общий шаг по времени для интегрирования полного уравнения волнового баланса равен 15 мин, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии – 60 с, шаг по времени для передачи энергии по спектру – 450 с.



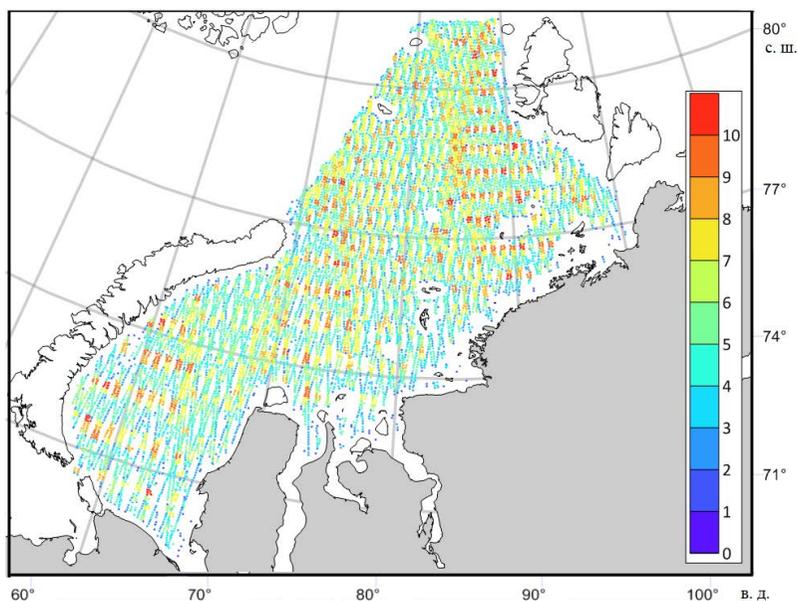
**Р и с. 1.** Схема расположения границ расчетных доменов *COSMO-CLM* (a): *слева* – основная (голубой прямоугольник – область с разрешением 12 км, розовый квадрат – область с разрешением 2,8 км); *справа* – дополнительная (голубой прямоугольник – область с разрешением 10 км, розовый квадрат – область с разрешением 3 км); неструктурная сетка для расчета ветрового волнения в Карском море (b)

**Fig. 1.** Layout of the boundaries of the *COSMO-CLM* simulation domains (a): *on the left* – the main (blue rectangle with the 12 km resolution domain, pink square with the 2.8 km resolution domain); *on the right* – the additional one (blue rectangle with the 10 km resolution domain, pink square with the 3 km resolution domain); the unstructured mesh for calculating wind waves in the Kara Sea (b)

Вычисления проводились на неструктурной триангуляционной сетке, состоящей из 37729 узлов. Данная сетка покрывает акваторию Баренцева и Карского морей, а также всю северную часть Атлантического океана (рис. 1, *b*). Для Карского моря шаг составляет 10 км в открытом море и 700 м у берега. Отметки глубин для вычислительной сетки для глубокой воды были получены на основе базы данных о рельефе дна *ETOPO1*, а для прибрежной зоны произведена оцифровка подробных навигационных карт. Более подробное описание конфигурации модели и особенности проведения экспериментов изложены в работах [9, 24].

При моделировании волнения использовались данные о ветре из мезомасштабной модели *COSMO-CLM* с различным шагом по пространству и шагом по времени 1 ч. Данные о концентрации льда с шагом по времени 1 ч получены из реанализа *NCEP/CFSv2* с разрешением  $\sim 0,2^\circ$ . Данные о скорости ветра из четырех ближайших узлов (из мезомасштабных моделей разного пространственного разрешения) линейно интерполировались на сетку волновой модели.

**Спутниковые данные.** Для оценки качества моделирования ветра и волнения для экспериментов 2012 г. использовались данные спутника *CryoSat*, а для экспериментов 2014 г. – данные спутников *CryoSat* и *SARAL*. Данные о высоте значительных волн и скорости ветра имеют пространственное разрешение  $\sim 7$  км вдоль трека и доступны на сайте базы данных *RADS (Radar Altimeter Database System)* <sup>6</sup>.



**Р и с. 2.** Данные альтиметра спутника *CryoSat* для сентября – октября 2012 г. Цветом обозначена плотность точек на квадрат  $13 \times 13$  км

**F i g. 2.** *CryoSat* altimeter data for September – October, 2012. Color indicates the points density at the  $13 \times 13$  km square

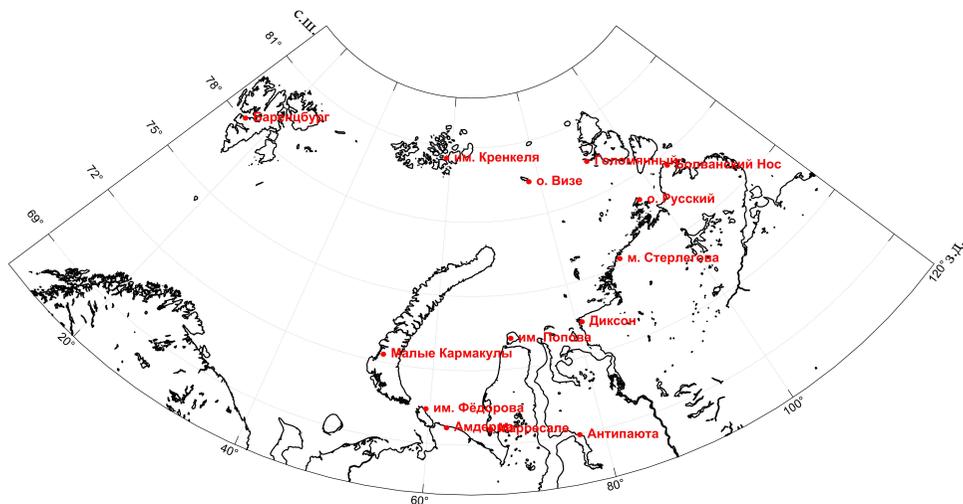
<sup>6</sup> URL: <http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml> (дата обращения: 24.06.2022).

При оценке качества данных моделирования расстояние между точками спутниковых данных и точками вычислительной сетки волновой или метеорологической модели не превышало 10 км.

Из спутниковых данных отфильтровывались значения, если точки находились ближе чем в 12 км от берега или от кромки льда, так как в этих случаях наблюдаются сильные выбросы.

После фильтрации и выборки ближайших точек для сетки волновой модели для сентября – октября 2012 г. получился массив данных о высоте волн со спутника *CryoSat*, состоящий из ~ 7500 значений. Для 2012 г. при сравнении спутниковых данных о скорости ветра с данными метеорологической модели массив спутниковых данных составил ~ 8000–15000 значений в зависимости от пространственного разрешения эксперимента. Для августа – сентября 2014 г. массив данных о скорости ветра со спутника *SARAL* составил ~ 8000–14000, с *CryoSat* – ~ 6000–11000. Схема треков альтиметра *CryoSat* для сентября – октября 2012 г. представлена на рис. 2.

**Данные метеостанций.** Результаты всех экспериментов верифицировались также по 3-часовым данным о скорости ветра прибрежных и островных метеорологических станций на акватории Карского моря и его окрестностей из базы данных ВНИИГМИ-МЦД (URL: <http://meteo.ru/data>), оценки проводились по ближайшим к метеостанциям узлам модельной сетки *COSMO-CLM* для следующих периодов экспериментов: сентябрь – октябрь 2012 г. и август – сентябрь 2014 г. Сравнение проводилось для 14 метеостанций (рис. 3), длина выборки на каждой станции для каждого эксперимента составила 488 значений, что позволяет делать более или менее обоснованные статистические оценки. Рассчитывались стандартные статистические метрики: средняя ошибка, СКО, стандартное отклонение, коэффициент корреляции. Указанные метеостанции расположены в разных частях Карского и частично Баренцева морей и характеризуются сильно различающимися локальными условиями, чем и обусловлен их выбор для оценки результатов моделирования.



**Рис. 3.** Метеостанции, данные которых использованы для верификации экспериментов *COSMO-CLM*

**Fig. 3.** Weather stations whose data were used to verify the *COSMO-CLM* experiments

**Описание численных экспериментов.** Для акватории Карского моря было проведено несколько численных экспериментов с моделью *COSMO-CLM*, были получены поля ветра на высоте 10 м с разным пространственным разрешением с использованием «спектральной подкачки» и без нее для сентября – октября 2012 г. и августа – сентября 2014 г. Для сентября – октября 2012 г. для всех вариантов форсинга проведен расчет параметров ветрового волнения при помощи модели *WAVEWATCH III*.

Конфигурация модели была адаптирована с учетом специфики гидрометеорологических условий Арктического региона, в частности увеличено количество вертикальных уровней модели для лучшего разрешения процессов в приземном слое (50 уровней всего, в том числе в пограничном слое – до 10 уровней, высота нижнего уровня – 20 м), который в Арктике тоньше, чем в умеренных широтах. Это важно для корректного воспроизведения полей приземного ветра, которые являются основным предметом исследования в данной работе.

Эксперименты проводились по стандартной схеме вложенных сеток, т. е. на базовой расчетной области в качестве начальных и граничных условий использовались данные глобального реанализа *ERA-Interim* с горизонтальным шагом сетки  $0,7^\circ$  ( $\sim 75$  км) [25], а на вложенной расчетной области – выходные данные моделирования на базовой области с уменьшением горизонтального разрешения и района моделирования. Применялись две схемы вложенных сеток (см. рис. 1, *a*). В основной схеме базовая расчетная область с разрешением  $0,12^\circ$  ( $\sim 12$  км) охватывает Северную Атлантику, Баренцево и Карское моря и приполярные районы. Такой охват стремится учесть преобладание процессов западного переноса в атмосферной циркуляции в регионе, а также распространение и влияние волнения и зыби в Атлантике на процессы в Карском море. Вложенная область моделирования с разрешением  $0,025^\circ$  ( $\sim 2,8$  км) полностью охватывает акваторию Карского моря, имея также некоторое распространение на запад. В дополнительной схеме (рис. 1, *b*) в качестве базовой области, как и в [26], используется обширная территория большей части Арктики с шагом сетки  $0,108^\circ$  ( $\sim 10$  км). Вложенная сетка с шагом  $0,03^\circ$  ( $\sim 3$  км) охватывает Карское море примерно так же, как и в основной схеме.

Следует отметить, что благодаря используемой в модели *COSMO-CLM* сетке со смещенным полюсом удастся избежать проблемы сходимости меридианов и, соответственно, резкого уменьшения шага сетки в километрах у полюса. Таким образом, приведенные шаги сетки в километрах достаточно равномерные по модельным областям, хотя и непостоянные, на краях областей незначительно превышают указанные значения. Далее в тексте эксперименты на расчетных областях по основной схеме с шагами сетки  $\sim 12$  км и  $\sim 2,8$  км носят названия *CCLM12* и *CCLM2.8*, а по дополнительной схеме с шагами сетки  $\sim 10$  км и  $\sim 3$  км – *CCLM10* и *CCLM3* соответственно.

Стандартная конфигурация модели для двух схем с вложенными сетками была дополнена вариантами с технологией «спектральной подкачки» (далее обозначены добавлением к названию «\_sl»). В «спектральной подкачке» из

реанализа усваивались поля температуры и зональной и меридиональной скоростей ветра в слое 850 гПа и выше с горизонтальным масштабом  $\sim 500$  км и более. В тестовом режиме были проведены также эксперименты с уменьшенным модельным шагом по времени  $dt$  и вложенным доменом большего размера, однако в данной работе эти результаты не рассматривались.

Эксперименты по описанным схемам проводились для двух периодов: август – октябрь 2012 г. и июль – сентябрь 2014 г. Периоды были выбраны исходя из соображений наименьшей площади морского льда в Карском море, чтобы ледовый покров оказывал по возможности минимальное влияние на характеристики волнения, а также с учетом доступности большего количества данных наблюдений за эти годы. Во всех случаях модель стартовала на месяц раньше указанного периода (в режиме так называемого *spin-up*) с целью достаточной адаптации модельных полей во времени. Все расчеты проводились на суперкомпьютере «Ломоносов-2» вычислительного комплекса МГУ имени М. В. Ломоносова [27].

### Результаты исследований и их обсуждение

#### Оценка результатов численного моделирования поля скорости ветра.

В результате моделирования были получены поля скорости ветра на высоте 10 м для сентября – октября 2012 и августа – сентября 2014 г. Для этих периодов было проведено сравнение модуля скорости ветра, полученного по данным моделирования и по данным спутников *SARAL* и *CryoSat* на акватории Карского моря.

В табл. 1–3 приведены статистические данные оценки качества результатов моделирования модуля скорости ветра, полученные по спутниковым данным.

Исходя из сравнения оценок для разных экспериментов, можно заключить, что все эксперименты без «спектральной подкачки» показывают более низкие корреляции и большие ошибки по сравнению с экспериментами с включением «спектральной подкачки». Эта тенденция сохраняется для разных периодов и при сравнении с данными с разных спутников, что является дополнительным подтверждением полученного вывода. Необходимо также отметить увеличение коэффициента корреляции и уменьшение СКО при увеличении пространственного разрешения для экспериментов со «спектральной подкачкой».

На рис. 4 представлены диаграммы рассеяния для некоторых экспериментов. Видно, что для эксперимента без использования «спектральной подкачки» диаграмма рассеяния имеет большой разброс значений, корреляция меньше (0,63 против 0,82), а *RMSE* больше (2,87 против 1,96 м/с). Из базовых доменов лучшие результаты показал эксперимент *CCLM12\_sn* с незначительными отличиями от *CCLM10\_sn*. В целом коэффициенты корреляции достигают в лучших конфигурациях  $\sim 0,83$ – $0,85$ , а СКО составляют  $\sim 1,8$  м/с. В то же время среди экспериментов на вложенных доменах лучше по статистике оказался *CCLM3\_sn*.

Таблица 1  
Table 1

Оценка качества результатов моделирования скорости ветра по данным *CryoSat*  
для сентября – октября 2012 г.  
Assessment of quality of the wind speed simulation results based on the *CryoSat*  
data for September – October, 2012

Эксперимент/ Experiment	Сентябрь / September			Октябрь / October			Сентябрь – Октябрь / September – October			
	<i>N</i>	<i>BIAS</i>	<i>RMSE</i>	<i>N</i>	<i>BIAS</i>	<i>RMSE</i>	<i>N</i>	<i>BIAS</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>
<i>CCLM2.8</i>	7176	-0,322	2,760	7794	-0,442	2,637	14970	-0,385	2,697	0,657
<i>CCLM2.8_sn</i>	7176	-0,450	2,043	7794	-0,292	2,017	14970	-0,368	2,030	0,796
<i>CCLM3</i>	7050	-0,909	3,083	7679	-0,312	2,655	14729	-0,598	2,868	0,629
<i>CCLM3_sn</i>	7050	-0,308	2,020	7679	-0,493	1,893	14729	-0,404	1,955	0,817
<i>CCLM10</i>	4249	-0,799	3,193	4549	-0,392	2,700	8798	-0,589	2,949	0,624
<i>CCLM10_sn</i>	4249	-0,187	1,885	4549	-0,571	1,830	8798	-0,386	1,857	0,835
<i>CCLM12</i>	4081	-0,353	2,677	4304	-0,565	2,592	8385	-0,462	2,634	0,676
<i>CCLM12_sn</i>	4081	-0,280	1,773	4304	-0,557	1,806	8385	-0,423	1,790	0,844

Примечание: *N* – количество данных в выборке; *BIAS* – систематическая ошибка; *RMSE* – среднеквадратическое отклонение; *R* – коэффициент корреляции; *STD* – стандартное отклонение.

Note: *N* is data amount in a sample; *BIAS* is a systematic error; *RMSE* is a standard deviation; *R* is a correlation coefficient; *STD* is a standard deviation.

Таблица 2  
Table 2

Оценка качества результатов моделирования скорости ветра по данным *CryoSat*  
для августа – сентября 2014 г.  
Assessment of quality of the wind speed simulation results based on the *CryoSat*  
data for August – September, 2014

Эксперимент / Experiment	Август / August			Сентябрь / September			Август – Сентябрь / August – September				
	N	BIAS	RMSE	N	BIAS	RMSE	N	BIAS	RMSE	R	
<i>CCLM2.8</i>	4473	0,249	2,713	0,610	1,004	2,918	0,584	11137	0,701	2,837	0,622
<i>CCLM2.8_sn</i>	4473	0,202	2,169	0,731	0,588	2,045	0,798	11137	0,433	2,096	0,784
<i>CCLM3</i>	4409	0,105	3,086	0,441	0,484	2,728	0,569	10966	0,332	2,877	0,546
<i>CCLM3_sn</i>	4409	0,408	2,102	0,764	0,768	1,909	0,823	10966	0,623	1,989	0,811
<i>CCLM10</i>	2690	0,001	3,859	0,142	0,672	3,101	0,473	6636	0,400	3,429	0,385
<i>CCLM10_sn</i>	2690	0,451	1,914	0,815	0,793	1,821	0,849	6636	0,654	<b>1,859</b>	<b>0,845</b>
<i>CCLM12</i>	2528	0,225	2,627	0,639	1,118	2,941	0,599	6219	0,755	2,818	0,644
<i>CCLM12_sn</i>	2528	0,537	1,964	0,796	0,663	1,676	0,877	6219	0,612	<b>1,799</b>	<b>0,852</b>

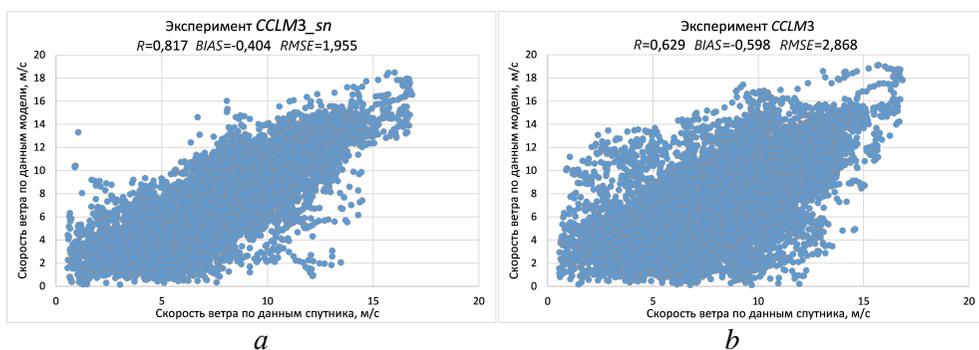
Примечание: обозначения как в табл. 1.  
Note: the designations are as in Table 1.

Таблица 3  
Table 3

Оценка качества результатов моделирования скорости ветра по данным SARAL  
для августа – сентября 2014 г.  
Assessment of quality of the wind speed simulation results based on the SARAL  
data for August – September, 2014

Эксперимент / Experiment	Август / August			Сентябрь / September			Август – Сентябрь / August – September					
	N	BIAS	RMSE	N	BIAS	RMSE	N	BIAS	RMSE	R		
CCLM2.8	5540	-0,578	2,753	0,674	8433	-0,382	2,948	0,576	13973	-0,382	2,948	0,576
CCLM2.8_sn	5540	-0,755	2,454	0,734	8433	-0,598	2,055	0,775	13973	-0,598	2,055	0,775
CCLM3	5470	-0,731	3,399	0,466	8309	-0,693	2,822	0,550	13779	-0,693	2,822	0,550
CCLM3_sn	5470	-0,520	2,240	0,780	8309	-0,442	1,882	0,793	13779	-0,442	1,882	0,793
CCLM10	3734	-0,972	4,497	0,079	5601	-0,619	3,204	0,439	9335	-0,619	3,204	0,439
CCLM10_sn	3734	-0,655	2,030	0,831	5601	-0,474	1,740	0,826	9335	-0,474	1,740	<b>0,826</b>
CCLM12	3450	-0,535	2,732	0,679	5154	-0,384	3,003	0,565	8604	-0,384	3,003	0,565
CCLM12_sn	3450	-0,540	1,987	0,827	5154	-0,492	1,743	0,832	8604	-0,492	1,743	<b>0,832</b>

Примечание: обозначения как в табл. 1.  
Note: the designations are as in Table 1.



**Р и с. 4.** Диаграммы рассеяния для скорости ветра по данным модели и спутника *CryoSat* для 2012 г.: *a* – эксперимент *CCLM3\_sn*; *b* – эксперимент *CCLM3*

**F i g. 4.** Scatterplots for wind speed based on the model and the *CryoSat* satellite data for 2012: *a* – the *CCLM3\_sn* experiment; *b* – the *CCLM3* experiment

Рассмотрим результаты оценки качества воспроизведения модуля скорости ветра для разных экспериментов на основе данных метеостанций. Сводные статистические характеристики верификации экспериментов по стационарным данным приведены в табл. 4, 5 с добавлением (в целях сопоставления качества) аналогичных оценок для данных трех современных реанализов, в том числе последнего поколения с высоким разрешением: *ERA-Interim* [25], *ERA5* [28] и *NCEP/CFSv2* [29].

Т а б л и ц а 4  
T a b l e 4

**Оценка качества воспроизведения скорости ветра по данным метеостанций для сентября – октября 2012 г.  
Assessment of quality of the wind speed reproduction based on the weather stations data for September – October, 2012**

Источник данных / Data source	<i>R</i>	<i>BIAS</i>	<i>RMSE</i>	<i>STD</i>
<i>Эксперименты / Experiments</i>				
<i>CCLM12_sn</i>	0,77	0,13	<b>2,19</b>	<b>1,96</b>
<i>CCLM10_sn</i>	0,69	0,38	2,45	2,31
<i>CCLM12</i>	0,61	0,08	2,84	2,69
<i>CCLM10</i>	0,56	0,16	2,97	2,83
<i>CCLM3</i>	0,60	-0,04	2,75	2,71
<i>CCLM2.8</i>	0,58	-0,51	2,85	2,72
<i>CCLM3_sn</i>	0,74	-0,40	2,25	2,14
<i>CCLM2.8_sn</i>	0,75	-0,01	<b>2,24</b>	<b>2,17</b>
<i>Реанализы / Reanalysis</i>				
<i>ERA-Interim</i>	0,73	0,39	2,25	2,05
<i>ERA5</i>	0,79	0,25	<b>2,05</b>	<b>1,80</b>
<i>NCEP-CFSv2</i>	0,79	0,43	2,21	1,98

Таблица 5  
Table 5

**Оценка качества воспроизведения скорости ветра  
по данным метеостанций для августа – сентября 2014 г.  
Assessment of quality of the wind speed reproduction based  
on the weather stations data for August – September, 2014**

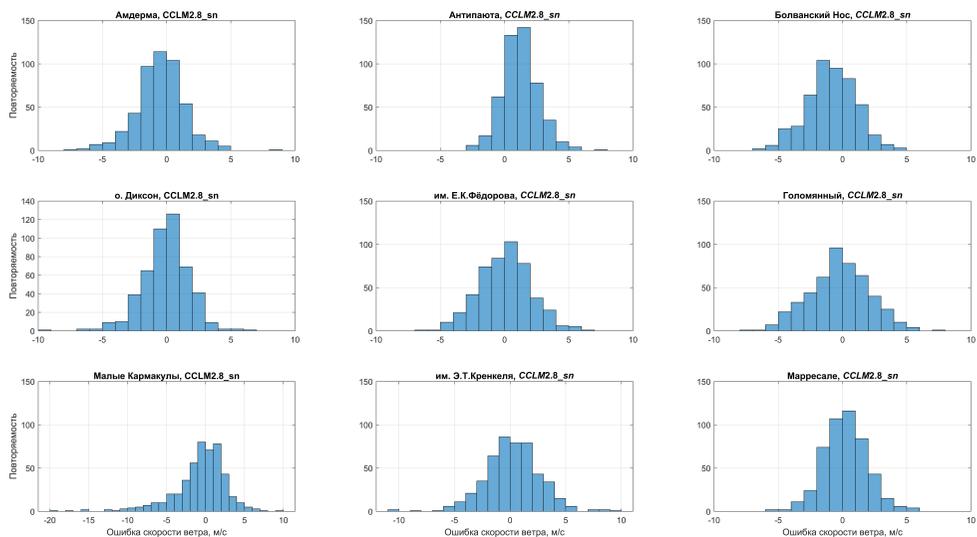
Источник данных / Data source	<i>R</i>	<i>BIAS</i>	<i>RMSE</i>	<i>STD</i>
<i>Эксперименты / Experiments</i>				
<i>CCLM12_sn</i>	0,77	0,39	<b>2,06</b>	<b>1,91</b>
<i>CCLM10_sn</i>	0,77	0,42	2,13	2,00
<i>CCLM12</i>	0,60	0,46	2,79	2,68
<i>CCLM10</i>	0,45	0,35	3,26	3,15
<i>CCLM3</i>	0,42	-0,19	3,20	3,12
<i>CCLM2.8</i>	0,60	0,46	2,82	2,73
<i>CCLM3_sn</i>	0,74	-0,09	<b>2,15</b>	<b>2,07</b>
<i>CCLM2.8_sn</i>	0,72	0,31	2,25	2,16
<i>Реанализы / Reanalysis</i>				
<i>ERA-Interim</i>	0,79	0,39	1,82	1,72
<i>ERA5</i>	0,78	0,38	<b>1,75</b>	<b>1,51</b>
<i>NCEP-CFSv2</i>	0,69	0,52	2,10	1,96

Проанализировав сводные результаты верификации, можно сделать вывод о том, что использование технологии «спектральной подкачки» однозначно улучшает воспроизведение приземных скоростей ветра по сравнению с базовой конфигурацией модели. При этом среди базовых доменов наиболее хорошие результаты показал эксперимент *CCLM12\_sn*, оказавшись заметно лучше *CCLM10\_sn*. В целом коэффициенты корреляции достигают 0,77, а систематические ошибки не превышают 0,5 м/с, СКО составляют около 2 м/с. В то же время среди экспериментов на вложенных доменах лучше по статистике оказался *CCLM3\_sn* с базового домена с шагом сетки 10 км. Это можно объяснить тем, что технология «спектральной подкачки» более качественно сработала на домене меньших размеров, но при этом более детальная мезомасштабная динамика была воспроизведена лучше на вложенном домене в схеме *CCLM10\_sn* – *CCLM3\_sn*. Разница между экспериментами *CCLM3\_sn* и *CCLM2.8\_sn* не столь велика, и эксперименты по схеме вложенных сеток от 10 к 3 км чаще отличаются занижением скоростей ветра. Стоит также отметить, что период 2014 г. характеризовался в целом большими ошибками, чем период 2012 г., описанные закономерности устойчиво проявляются в группах экспериментов для обоих периодов.

Что касается анализа ошибок на отдельных станциях, то в эксперименте на базовом домене значения коэффициентов корреляции для станций составили 0,5–0,7, в среднем 0,6, худшие показатели у станций им. Э. Т. Кренкеля и на о. Русском (~ 0,45). При этом значения средних ошибок для большинства станций вполне удовлетворительны (менее 1 м/с, в среднем -0,08, за исключением станций Болванский Нос, Антипаюта и Малые Кармакулы), что отражает факт реалистичного воспроизведения динамики и изменчивости процес-

сов синоптического масштаба в течение двух месяцев. В частности, на ст. Малые Кармакулы большие ошибки (до 15–20 м/с) связаны с часто наблюдающимися там экстремальными скоростями ветра, обусловленными Ново-земельской борой, в формирование и изменчивость которой вносят значительный вклад мезомасштабные процессы и изрезанность береговой линии [12, 30]. Кроме того, учитывая, что сравнение данных метеостанций проводилось с данными модели в ближайшем узле сетки, дополнительными источниками неточностей и факторами ошибок являются расстояние между этими точками, достигающее в отдельных случаях нескольких километров, а также несоответствие подстилающей поверхности в маске модели (суша/море) реальным условиям изрезанной береговой линии и пересеченного рельефа.

На вложенных доменах статистические характеристики ошибок в целом те же, за исключением того, что СКО на некоторых станциях уменьшается, в особенности на тех из них, где СКО было максимальным (средняя СКО – 2,25 м/с по сравнению с максимальным значением 2,84 м/с), см. также подробнее [15]. Учитывая, что согласно официальной методике оценок точности прогноза ветра ошибка не должна превышать  $\pm 4,5$  м/с<sup>7</sup>, можно признать результаты расчетов вполне качественными, в том числе для использования в последующих расчетах ветрового волнения. В качестве примера на рис. 5 приведены гистограммы распределения ошибок на некоторых станциях для эксперимента *CCLM2.8\_sn* 2012 г.



**Р и с. 5.** Примеры гистограмм распределения ошибок на некоторых станциях для эксперимента *CCLM2.8\_sn* 2012 г.

**F i g. 5.** Examples of the error distribution histograms at some stations for the *CCLM2.8\_sn* experiment, 2012

<sup>7</sup> Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения : РД 52.27.724-2009. Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2009. 62 с.

Результаты верификации позволяют решить вопрос о том, насколько сравнимы ошибки в проведенных модельных экспериментах с ошибками существующих массивов гидрометеорологической информации более грубого разрешения, такими как реанализы *ERA-Interim* и *ERA5* от *ECMWF*, *NCEP-CFSv2* от *NCEP* (табл. 4 и 5). Видно, что только лучшие модельные конфигурации с использованием «спектральной подкачки» сопоставимы по качеству с представленными реанализами, но по некоторым показателям немного проигрывают им. Это можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, в реанализах происходит полноценное усвоение данных всех наблюдений, в том числе приводного спутникового ветра [9, 28], а в экспериментах *COSMO-CLM* реанализ используется только в качестве начальных и граничных условий с учетом «спектральной подкачки», никакого дополнительного усвоения данных не происходит. Во-вторых, детализация глобальных полей мезомасштабными моделями может проявляться в воспроизведении явлений, в том числе связанных, например, с усилениями ветра, несколько смещенными относительно их реального положения. В таких ситуациях сравнение «точка с точкой» будет демонстрировать значительные ошибки, несмотря на то что фактически явление и его свойства были воспроизведены и более успешно, чем на грубой сетке глобальных реанализов [14, 15]. Сравнивая результаты верификации скорости ветра по спутниковым и стационарным данным, можно констатировать, что ошибки сопоставимы, при этом важно, что эти оценки получены по независимым источникам данных.

Таким образом, в своих лучших вариантах конфигурации мезомасштабной модели *COSMO-CLM*, несмотря на отсутствие усвоения данных наблюдений, оказываются сопоставимыми по качеству с глобальными реанализами. При этом данные мезомасштабного моделирования получены на более детальной сетке, что важнее для целого ряда прикладных задач с точки зрения воспроизведения процессов соответствующего масштаба, в том числе в прибрежной зоне. При этом следует подчеркнуть, что существенной проблемой является сложность оценки качества результатов мезомасштабного моделирования. В частности, в прибрежной зоне отсутствует возможность сравнения со спутниковыми данными.

При этом для корректного моделирования волнения более важно, чтобы правильно воспроизводилась интегральная энергия ветра над акваторией (масштаб около 50–100 км), что связано с механизмом генерации и распространения волн. Учитывая приведенные обстоятельства, можно считать результаты модельных экспериментов достаточно успешными.

Суммируя результаты, среди представленного набора конфигураций можно считать оптимальными с точки зрения воспроизведения именно приземной скорости ветра конфигурации с использованием «спектральной подкачки» на базовом домене 12 км (*CCLM12\_sn*), а также на вложенном домене 3 км, т. е. *CCLM3\_sn*. Возможно, более оптимальным в перспективе будет использование схемы даунскейлинга *CCLM10\_sn* – *CCLM3sn*.

Однако для более полного анализа качества мезомасштабных экспериментов представляется важным анализ результатов верификации полей ветрового волнения, который приведен в следующем разделе.

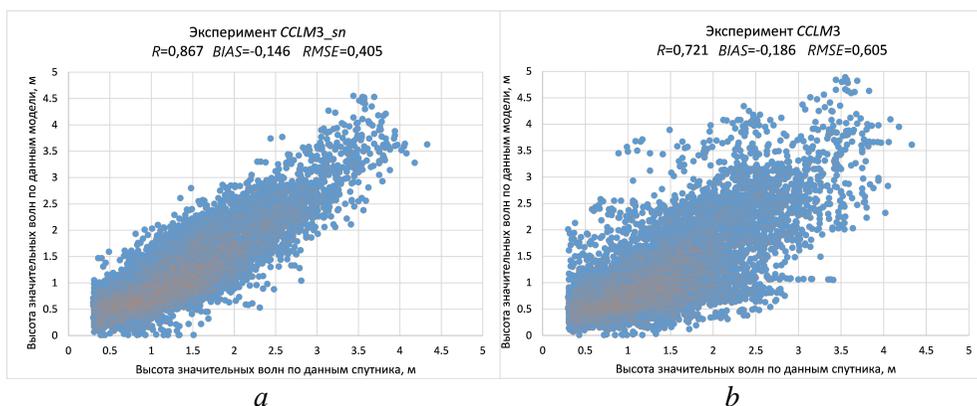
**Оценка результатов численного моделирования ветрового волнения.** Далее было выполнено сравнение высоты значительных волн по результатам модели *WAVEWATCH III* с использованием полей ветра из экспериментов *CCLM* с разным пространственным разрешением с данными, полученными со спутника *CryoSat*. Результаты сравнения для сентября – октября 2012 г. на акватории Карского моря представлены в табл. 6. Массив данных для сравнения включает ~ 7500 значений.

Т а б л и ц а 6  
T a b l e 6

**Оценка качества воспроизведения высоты значительных волн по данным моделирования и спутника *CryoSat* для сентября – октября 2012 г.**  
**Assesment of quality of reproducing the heights of significant waves based on the data of simulation and the *CryoSat* satellite for September – October, 2012**

Эксперимент / Experiment	<i>BIAS</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>
<i>CCLM2.8</i>	-0,134	0,541	0,754
<i>CCLM2.8_sn</i>	-0,154	0,418	0,862
<i>CCLM3</i>	-0,186	0,605	0,721
<i>CCLM3_sn</i>	-0,146	<b>0,405</b>	<b>0,867</b>
<i>CCLM10</i>	-0,158	0,618	0,711
<i>CCLM10_sn</i>	-0,140	<b>0,405</b>	<b>0,867</b>
<i>CCLM12</i>	-0,185	0,555	0,746
<i>CCLM12_sn</i>	-0,204	0,414	0,875

Исходя из полученных результатов получается, что высота волн более успешно воспроизводится при использовании полей ветра из экспериментов со «спектральной подкачкой». Наименьшие ошибки получились для варианта *CCLM3\_sn* и *CCLM10\_sn*. Использование форсинга со «спектральной подкачкой», безусловно, дает более высокое качество моделирования ветровых волн, что показано на диаграммах рассеяния (рис. 6).



**Р и с. 6.** Диаграммы рассеяния для высоты значительных волн по данным модели и спутника *CryoSat* для сентября – октября 2012 г.: *a* – эксперимент *CCLM3\_sn*; *b* – эксперимент *CCLM3*  
**F i g. 6.** Scatterplots for the heights of significant waves based on the model and the *CryoSat* satellite data for September – October, 2012: *a* – the *CCLM3\_sn* experiment; *b* – the *CCLM3* experiment

В общем, качество воспроизведения высоты волн эксперимента *CCLM3\_sn* вполне удовлетворительное, разброс точек небольшой и примерно соответствует современным оценкам, которые получают для волновых моделей [1, 3, 8, 10, 11].

Следует отметить, что статистические показатели для высоты волн получились лучше, чем аналогичные результаты для скорости ветра. Это связано с тем, что поле ветра намного более изменчиво, а в мезомасштабных моделях присутствуют пульсации различного пространственно-временного масштаба. Для поля ветровых волн, наоборот, наблюдается кумулятивный эффект перекачки энергии от ветра к волне для акватории, что приводит к меньшему разбросу величин и более высоким коэффициентам корреляции. Можно также предположить, что интегральный поток энергии от ветра к волне при использовании полей ветра из мезомасштабной метеорологической модели задается корректно, так как систематические ошибки для высоты волн невелики. Ранее было показано, что при сопоставлении высоты значительных волн по данным прямых и спутниковых измерений и по результатам моделирования с использованием ветра *NCEP/CFSR* получены коэффициенты корреляции  $\sim 0,89$ – $0,94$ , СКО  $\sim 0,31$  до  $0,39$  м [9, 24].

Таким образом, полученные результаты воспроизведения ветрового волнения с использованием полей ветра из экспериментов *CCLM* для открытого моря показали результат несколько хуже, чем при использовании полей ветра *NCEP/CFSR*. Это может быть связано с различной длиной выборки. Тем не менее для открытого моря более целесообразно использовать глобальные реанализы ветра, а для прибрежной зоны для учета орографических эффектов – данные мезомасштабных моделей.

### Выводы

1. Для акватории Карского моря проведено восемь численных экспериментов с конфигурациями мезомасштабной модели *COSMO-CLM* на доменах с различным пространственным разрешением от 2,8 до 12 км.

2. Получены оценки качества воспроизведения скорости ветра на основе спутниковых данных и данных метеостанций. При сравнении со спутниковыми данными наилучший результат получен для конфигурации *CCLM12\_sn*:  $RMSE = 1,7 \dots 1,8$  м/с,  $R = 0,83 \dots 0,85$ . Немного уступают по качеству конфигурации *CCLM10\_sn* и *CCLM3\_sn*. При сравнении с данными метеостанций наилучший результат получен для конфигурации *CCLM3\_sn*:  $RMSE = 2,1 \dots 2,2$  м/с,  $R \sim 0,75$ . Немного уступают по качеству конфигурации *CCLM2.8\_sn* и *CCLM10\_sn*.

3. Выполнены расчеты параметров ветрового волнения на основе волновой модели *WAVEWATCH III*. Получены оценки качества воспроизведения высоты волн при использовании полей ветра из различных конфигураций модели *COSMO-CLM*. Наилучшие показатели получены при использовании форсинга конфигураций *CCLM3\_sn* и *CCLM10\_sn*, для которых  $RMSE = \sim 0,4$  м,  $R = \sim 0,87$ .

4. Таким образом, показано, что использование технологии «спектральной подкачки» улучшает качество воспроизведения модуля скорости ветра и волнения системой *COSMO-CLM – WW3* для региона Карского моря во всех случаях.

5. При этом результаты моделирования *COSMO-CLM* с использованием «спектральной подкачки» несколько уступают по качеству современным реанализам *ERA5* и *CFSv2*. Поскольку различия невелики, а мезомасштабное моделирование позволяет воспроизводить более детальную структуру поля ветра, в особенности в прибрежных районах, результаты моделирования позволяют использовать поля ветра с разрешением 3 км для различных научных и прикладных задач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верификация модельных расчетов волнения на акватории Обской губы по данным инструментальных измерений в 2015-2017 годах / П. В. Коробов [и др.] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 79–89. EDN ZHUYPМ. doi:10.37162/2618-9631-2020-2-79-89
2. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики / Н. А. Дианский [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1 (13). С. 57–73. EDN RXNOMF.
3. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / Под ред. Е. С. Нестерова. М., 2013. 295 с.
4. Состояние и перспективы развития системы мониторинга гидрологических условий акватории Северного Ледовитого океана / И. М. Ашик [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 1. С. 8–25. EDN RGTQLD. doi:10.30758/0555-2648-2022-68-1-8-25
5. The NCEP climate forecast system reanalysis / S. Saha [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. Vol. 91, iss. 8. P. 1015–1058. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
6. *Hulst S., van Vledder G. Ph.* CFSR Surface wind calibration for wave modelling purposes // 13<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and 4<sup>th</sup> Coastal Hazards Symposium: proceedings. 2013. URL: <http://www.waveworkshop.org/13thWaves/index.htm> (date of access: 19.11.2022).
7. Evaluation of SARAL/AltiKa Measured Significant Wave Height and Wind Speed in the Indian Ocean Region / C. Jayaram [et al.] // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2016. Vol. 44, iss. 2. P. 225–231. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0488-7>
8. Assessment of CryoSat-2 SAR mode wind and wave data / S. Abdalla [et al.] // Advances in Space Research. 2018. Vol. 62, iss. 6. P. 1421–1433. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.01.044>
9. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia / S. Myslenkov [et al.] // Water. 2021. Vol. 13, iss. 5. 648. <https://doi.org/10.3390/w13050648>
10. *Stopa J., Arduin F., Girard-Arduin F.* Wave climate in the Arctic 1992-2014: seasonality and trends // The Cryosphere. 2016. Vol. 10, iss. 4. P. 1605–1629. doi:10.5194/tc-10-1605-2016
11. *Duan C., Dong S., Wang Z.* Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea // Regional Studies in Marine Science. 2019. Vol. 30. 100719. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100719>
12. *Shestakova A. A., Myslenkov S. A., Kuznetsova A. M.* Influence of Novaya Zemlya Bora on Sea Waves: Satellite Measurements and Numerical Modeling // Atmosphere. 2020. Vol. 11, iss. 7. 726. <https://doi.org/10.3390/atmos11070726>

13. Дианский Н. А., Панасенкова И. И., Фомин В. В. Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 6. С. 530–548. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-530-548
14. Platonov V., Kislov A. High-resolution COSMO-CLM modeling and an assessment of mesoscale features caused by coastal parameters at near-shore Arctic zones (Kara Sea) // Atmosphere. 2020. Vol. 11, iss. 10. 1062. <https://doi.org/10.3390/atmos11101062>
15. Высокора разрешающее моделирование гидрометеорологических полей в прибрежных районах Карского моря в условиях сложной конфигурации береговой линии / В. С. Платонов [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. Вып. 1. С. 87–106.
16. A description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part II: Physical parameterizations. / G. Doms [et al.]. Offenbach, Germany : DWD, 2013. 156 p. doi:10.5676/DWD\_pub/nwv/cosmo-doc\_5.00\_II
17. Rockel B., Geyer B. The performance of the regional climate model CLM in different climate regions, based on the example of precipitation // Meteorologische Zeitschrift. 2008. Vol. 17, no. 4. P. 487–498. doi:10.1127/0941-2948/2008/0297
18. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития / Г. С. Ривин [и др.] // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58–70. EDN TUDRCX.
19. Doms G., Baldauf M. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part I: Dynamics and Numerics. Offenbach, Germany : DWD, 2013. doi:10.5676/DWD\_pub/nwv/cosmo-doc\_5.00\_I
20. Arakawa A., Lamb V. R. Computational Design of the Basic Dynamical Processes of the UCLA General Circulation Model // General Circulation Models of the Atmosphere / Ed. by J. Chang. New York : Academic Press, Inc., 1977. P. 173–265. (Methods in Computational Physics: Advances in Research and Applications ; vol. 17). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-460817-7.50009-4>
21. Feser F., Barcikowska M. The influence of spectral nudging on typhoon formation in regional climate models // Environmental Research Letters. 2012. Vol. 7, no. 1. 014024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014024>
22. Optimal spectral nudging for global dynamic downscaling / M. Schubert-Frisius [et al.] // Monthly Weather Review. 2017. Vol. 145, iss. 3. P. 909–927. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0036.1>
23. Моделирование штормового волнения в Баренцевом море / С. А. Мысленков [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 6. С. 65–75.
24. Рост штормовой активности в Карском море с 1979 по 2019 г. по данным моделирования / С. А. Мысленков [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 498, № 2. С. 175–182. doi:10.31857/S2686739721060128
25. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
26. Platonov V., Varentsov M. Introducing a new detailed long-term COSMO-CLM hindcast for the Russian Arctic and the first results of its evaluation // Atmosphere. 2021. Vol. 12, iss. 3. 350. <https://doi.org/10.3390/atmos12030350>
27. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community / V. Voevodin [et al.] // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2019. Vol. 6, no. 2. P. 4–11. <https://doi.org/10.14529/jsfi190201>
28. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
29. The NCEP Climate Forecast System version 2 / S. Saha [et al.] // Journal of Climate. 2014. Vol. 27, iss. 6. P. 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>

30. *Shestakova A. A., Toropov P. A., Matveeva T. A.* Climatology of extreme downslope windstorms in the Russian Arctic // *Weather and Climate Extremes*. 2020. Vol. 28. 100256. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100256>

*Об авторах:*

**Мысленков Станислав Александрович**, старший научный сотрудник кафедры океанологии Географического факультета, МГУ имени М. В. Ломоносова (19991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д.1); кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7700-4398**, [stasocean@gmail.com](mailto:stasocean@gmail.com)

**Платонов Владимир Сергеевич**, старший научный сотрудник кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета, МГУ имени М. В. Ломоносова (19991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д.1), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7256-1451**, [vplatonov86@gmail.com](mailto:vplatonov86@gmail.com)