

УДК 551.465

С.А. Мысленков¹, В.С. Платонов², П.А. Торопов³, А.А. Шестакова⁴

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТОРМОВОГО ВОЛНЕНИЯ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Представлена реализация спектральной волновой модели SWAN для Баренцева моря, включающая также северную часть Атлантического океана. Используется нерегулярная вычислительная пространственная сетка, шаг которой в Атлантическом океане составляет 1°, в Баренцевом – 0,5°. В качестве вынуждающей силы (форсинга) использовали поля ветра реанализа NCEP-CFSR, а также данные мезомасштабных моделей WRF-ARW и COSMO-CLM.

Для оценки качества моделирования результаты сравнили со спутниковыми данными о высоте волн. Численные расчеты выполнены для января 2010 г., так как в этот период наблюдался ряд сильных штормов. Кроме того, результаты моделирования волн сравнили с результатами модели AARI-PD2, реализованной в ААНИИ. Показано, что обе модели в целом адекватно воспроизводят ветровой режим в точках станций. Синоптическая изменчивость скорости ветра восстанавливается хорошо, однако местные особенности воспроизводятся значительно хуже. О том, что общая изменчивость воспроизводится неплохо, свидетельствуют значимые величины коэффициента корреляции (в среднем 0,7), однако этот факт не гарантирует правильного воспроизведения ветровых волн. Результаты моделирования ветрового волнения позволили установить, что в текущей конфигурации использование форсингов COSMO-CLM и WRF дает результат, близкий к NOAA и NCEP-CFSR.

Ключевые слова: ветровое волнение, SWAN, нерегулярная сетка, WRF, COSMO, CFSR, Баренцево море.

Введение. Изучение гидрометеорологических условий в арктических морях России – приоритетная задача в связи с освоением шельфовых месторождений нефти и газа, развитием судоходства по Северному морскому пути и сопутствующей инфраструктуры.

Особенности ветрового режима и волнового климата арктических морей России приведены в [Справочные..., 2003], где, в частности, показано, что высота волн 50%-ной обеспеченности с повторяемостью 1 раз в год составляет 6,1 м, а для 0,1%-ной обеспеченности – >19 м. Периоды, в течение которых скорость ветра не превышает 15 м/с, в зимние месяцы в среднем составляют 3–6 дней, т.е. значительную часть года над акваториями Арктики господствует штормовая погода, в связи с чем чрезвычайно важно развить методы точного прогноза ветрового режима и волнения.

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 [Дымов и др., 2004; Зеленко и др., 2014; Режим..., 2013; Справочные..., 2003]. Отметим, что арктические моря отличаются также низкой обеспеченностью метеорологичес-

кими наблюдениями, поэтому численные модели атмосферы часто представляют собой единственный источник данных о скорости ветра. Многочисленные оценки полей скорости ветра, полученные из результатов глобальных моделей, показывают, что в отдельных узлах расчетной сетки ошибки могут быть большими и в отдельных случаях превышать 10 м/с. Однако значения скорости для отдельно взятого прогностического срока, осредненные по территориям (акваториям), площадь которых превышает 10 модельных ячеек (в зависимости от пространственного разрешения современных моделей 250–1000 км²) оказываются удовлетворительными [Торопов, 2005]. Таким образом, необходимо четко знать границы применимости глобальных атмосферных моделей (крупные открытые моря, значительные акватории океанов и т.д.). Для воспроизведения ветрового режима закрытых морей или акваторий со сложной береговой линией представляется целесообразным использовать региональные модели.

Кроме того, численные модели атмосферы используют для восстановления длинных рядов метеорологических величин в каждом узле расчетной сетки. Реализуется технология усвоения атмосферной моделью данных наблюдений различного типа за весь (или максимально возможный) период измерений. Эта процедура называется реанализом, результаты которого широко применяются

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с.; e-mail: stasocean@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: vplatonov86@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: tormet@inbox.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии, аспирантка; e-mail: anna@sarez-lake.ru

в различных задачах геофизики и географии, в том числе для восстановления режима ветрового волнения.

В Гидрометцентре России реализована схема прогноза волнения в Баренцевом море при помощи модели WW3. Расчеты ведутся с пространственным разрешением 9 км и с использованием начальных данных модели GFS. Качество модели оценивалось по спутниковым данным, результаты испытаний были признаны удовлетворительными [Зеленько и др., 2014].

Среди отечественных работ, посвященных моделированию волнения в Баренцевом море, отметим работу [Справочные..., 2003], где модель SWAN использовалась для составления морского регистра, оценки показали хорошее совпадение результатов моделирования с данными наблюдений.

Расчеты и прогнозы ветрового волнения в России также осуществляются с использованием спектрально-параметрической модели ААНИИ (PD2-AARI). Модель неоднократно верифицировалась по данным инструментальных наблюдений на различных акваториях и сопоставлялась с такими известными в мире моделями, как WAM и WAVEWATCH. Результаты статистических оценок точности прогнозов высоты волн для всех моделей примерно одинаковы (среднеквадратическая ошибка составляет ~0,5 м, коэффициент корреляции между наблюдаемыми и расчетными значениями равен 0,9 [Дымов и др., 2014; Режим..., 2013]).

В работе [Дианский и др., 2014] 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 указывает на положительный эффект от применения ветрового форсинга мезомасштабных моделей с высоким пространственным разрешением.

Однако существующие системы диагноза и прогноза ветрового волнения используют глобальные поля ветра грубого разрешения (20–50 км), в то время как работы с использованием мезомасштабных метеорологических моделей высокого разрешения пока единичны [Dykes et al., 2009; Gusdal et al., 2009; Schoch et al., 2011]. Между тем интересно использовать именно эти модели, принимая во внимание возможность учета мезомасштабных штормовых явлений, таких, как полярные мезоциклоны, которые вносят ощутимый вклад в общую повторяемость штормов. Нами предпринята попытка использовать в качестве ветрового форсинга результаты мезомасштабных моделей WRF-ARW и COSMO-CLM, оценить точность воспроизведения скорости ветра и высоты волны, а в итоге целесообразность применения мезомасштабных моделей для анализа и прогноза штормовых условий в Арктике.

Результаты моделирования волнения во многом зависят от качества задаваемого поля скорости ветра. Однако остается вопрос о качестве ана-

лиза и прогноза гидрометеорологических полей мезомасштабных моделей в морях Российской Арктики в силу отсутствия контактных наблюдений и низкой точности данных, полученных с полярно-орбитальных спутников. Возобновление в регионе наблюдений в последние 5–10 лет дает возможность оценить результаты атмосферного моделирования по крайней мере в точках береговых и островных метеостанций.

Отметим, что, несмотря на значительные успехи в направлении численного моделирования глобальных атмосферных процессов, результаты анализа и прогноза в ряде регионов Арктики до сих пор оставляют желать лучшего. Это неплохо продемонстрировано, в частности, в работе [Lindsay et al., 2014], где выполнено сравнение различных реанализов в точках станций, расположенных севернее 60° с.ш., и показано, что в большинстве точек величины ошибок велики, а корреляция незначима. Этот факт показывает целесообразность использовать данные регионального моделирования атмосферы в Арктике, в частности, в рамках задачи анализа и прогноза морского волнения.

В статье представлены результаты моделирования волнения в Баренцевом море с помощью спектральной волновой модели SWAN. В качестве ветрового форсинга использованы результаты регионального моделирования с помощью моделей WRF-ARW и COSMO-CLM. Для корректного воспроизведения волн в Баренцевом море в расчетную область включен весь Атлантический океан (в то время как в большинстве работ в область моделирования включается лишь часть Атлантики), откуда волны могут свободно распространяться, в частности, в Баренцево море.

Материалы и методы исследований. *Модель SWAN.* Для моделирования волнения использована спектральная волновая модель третьего поколения SWAN, позволяющая рассчитывать параметры ветровых волн при заданном поле ветра и рельефе дна, подробное описание модели приведено в [SWAN..., 2007]. Эта модель уже использовалась для моделирования волнения в Баренцевом море и Атлантическом океане; показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с данными наблюдений [Дымов и др., 2004; Режим..., 2013; Справочные..., 2003; Reistad et al., 2011].

В качестве входных данных о ветре, кроме полей ветра, полученных в экспериментах с моделями WRF и COSMO-CLM, нами использованы также данные реанализа высокого разрешения NCEP-CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (1979–2010) [CISL..., 2014; Saha et al., 2014]. Пространственное разрешение реанализа составляет ~0,3°. Выбор данных NCEP-CFSR обусловлен их высоким разрешением и хорошим качеством (сравнение данных о скорости и направлении ветра реанализа с данными метеостанции в арктическом бассейне показало, что ошибка NCEP-CFSR минимальна по сравнению с другими реанализами; отмечены значимые значения коэффициента корреляции [Lindsay et al., 2014]).

Волновую модель SWAN оценивали по данным спутниковой альтиметрии, доступным на AVISO [Aviso...]. Данные альтиметрии для Арктического региона не отличаются высоким качеством [Janssen et al., 2006], однако они вполне подходят для качественного сравнения с результатами модели в рамках поставленной задачи.

Кроме того, привлекались данные волнового реанализа NOAA с пространственным разрешением $1,25^\circ \times 1^\circ$ [NOAA..., 2014], основанного на модели WaveWatch 3 и данных о ветре из реанализа CFSR с разрешением $0,5^\circ$.

Использована оригинальная нерегулярная вычислительная сетка, в Атлантическом океане шаг сетки составляет 1° , в Баренцевом море – $0,5^\circ$, в Белом море – $0,2^\circ$. Общее число узлов – 15 000. В качестве жесткой границы на севере и востоке исследуемой области задавалось среднemesячное положение кромки льда. Данные о концентрации льда для определения границы льдов и чистой воды взяты из архивов Лаборатории спутниковой океанографии (Санкт-Петербург) [Arctic..., 2014]. Использование среднemesячного положения кромки льда обосновано малой изменчивостью кромки в течение января 2010 г., поэтому суточное или декадное положение кромки мало отразилось бы на результатах моделирования волнения.

Мезомасштабная модель WRF. В качестве одной из мезомасштабных моделей атмосферы для расчетов ветрового форсинга в исследуемом регионе нами выбрана модель WRF-ARW [WRF..., 2014]. В работах [Бычкова и др., 2010; Макштас и др., 2009] показано, что эта модель удовлетворительно воспроизводит ветровой режим в Арктике, продемонстрирована принципиальная возможность использовать полярную версию модели WRF для арктических районов.

Конфигурация модели WRF, подобранная для данного эксперимента, выглядит следующим образом: число вертикальных уровней – 45, шаг интегрирования по времени – 30 с; порядок дискретизации адвективных членов – 4, параметризация пограничного слоя MYNN 2.5, параметризация микрофизики облаков Thompson. Именно такая конфигурация позволяет лучше всего воспроизводить поля ветра, как показано в работах [Торопов и др., 2013; Торопов, Шестакова, 2014; Торопов et al., 2014]. Поля ветрового форсинга для усвоения в модели SWAN подготавливались с временным шагом 1 ч.

Мезомасштабная модель 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). Развитие климатической версии модели осуществляется в рамках международного научного сообщества CLM-Community [CLM-Community..., 2014]. Главные отличия климатической версии модели от оперативной заключаются в ряде модификаций и расширений, предназначенных

для долговременных численных экспериментов, таких, как большая глубина моделируемого слоя подстилающей поверхности и учет сезонного хода параметров подстилающей поверхности [Boehm et al., 2006].

Модельные уравнения решаются на вращающейся сетке широта–долгота с координатами (λ, φ) . В роли вертикальной координаты выступает гибридная величина μ (σ - z -система), представленная σ -координатой от земной поверхности (Z_0) до промежуточного уровня Z_p , а выше уровня Z_p – обычной Z -координатой. Такое представление вертикальных координат позволяет избежать проблем, связанных с неоднородностью рельефа подстилающей поверхности. По умолчанию используется дискретизация адвективных членов 5-го порядка.

Подробное описание физики и динамики модели и параметризаций подсеточных процессов можно найти на странице документации модели [COSMO..., 2014].

Региональная модель COSMO-CLM применяется членами консорциума для решения широкого спектра задач. Например, COSMO-CLM использовалась в качестве компонента совмещенной модели океана–атмосферы COSMO-CLM/NEMO для оценки распределения и динамики температуры воздуха в Северном и Балтийском морях [Van Pham et al., 2014], а также в экспериментах по воспроизведению динамики полярных мезоциклонов [Varentsov et al., 2015] и их статистических оценок а длительный интервал времени [Chen et al., 2013]. Кроме того, региональная модель COSMO-CLM применялась для статистического анализа (даунскейлинга) штормов над акваторией Западной Европы [Haas, Pinto, 2000]. Однако работы по воспроизведению случаев штормовых волнений в арктических морях с моделью COSMO-CLM, совмещенной с океанической, ранее не проводились.

Описание численных экспериментов. Для корректной оценки результатов моделирования эксперименты по воспроизведению ветрового форсинга были максимально унифицированы, а именно: подобраны одинаковые для обеих моделей (WRF-ARW и COSMO-CLM) расчетные области, охватывающие территорию от 20° з.д. до 90° в.д. и от 55° до 90° с.ш. (рис. 1). Таким образом, область, помимо Баренцева и части Карского морей, включает значительную часть акватории Северной Атлантики. Пространственный шаг сетки составляет ~ 14 км, число вертикальных уровней – 45 у модели WRF и 50 у COSMO-CLM. В качестве начальных и граничных условий для обеих моделей использованы результаты реанализа CFSR. Эксперименты проводились на суперкомпьютерном комплексе «Ломоносов» МГУ имени М.В. Ломоносова [Воеводин и др., 2012] и СК «Cray» Лаборатории оценки природных рисков. Расчеты выполнены для января 2010 г. из-за достаточно большой повторяемости сильных ветров и штормов и относительно неплохой обеспеченности натурными данными в этот период.

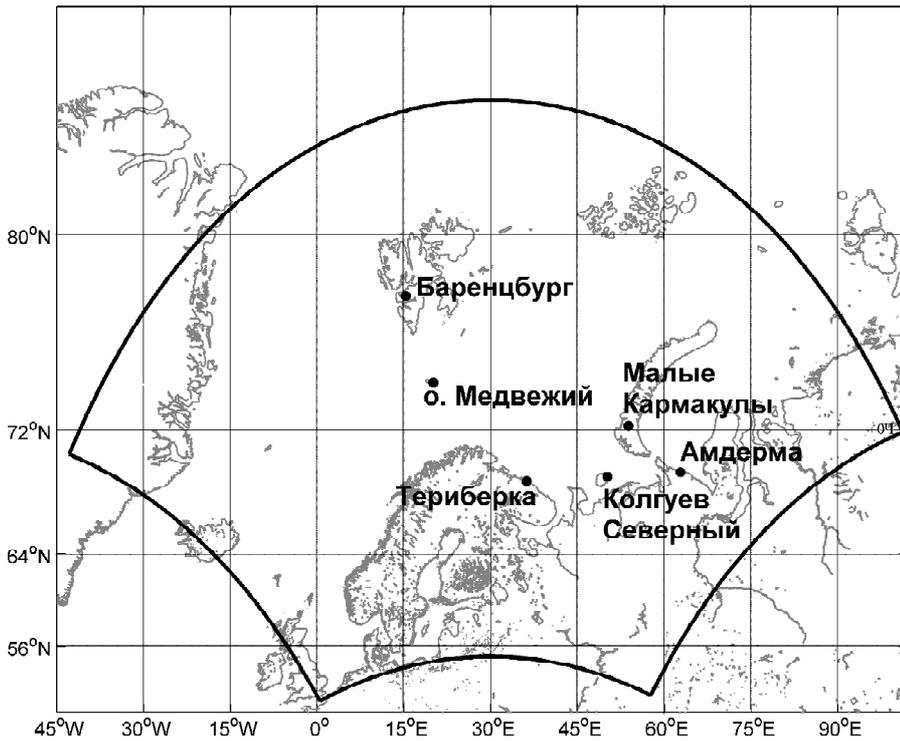


Рис. 1. Граница расчетной области моделей COSMO-CLM и WRF-ARW с метеорологическими станциями, данные которых использованы для сравнения

Fig. 1. The boundary of the computational domain for COSMO-CLM and WRF-ARW models and meteorological stations which data were used for comparison

Результаты численных расчетов по моделям WRF и COSMO-CLM использованы для расчетов ветрового волнения в модели SWAN. Всего выполнено 3 эксперимента с использованием различных комбинаций входных полей ветра. В первом эксперименте на всей вычислительной области модели SWAN, охватывающей Атлантику в Северном полушарии, задавалось поле ветра из реанализа CFSR. Во втором эксперименте использовано поле ветра из модели WRF в районе Баренцева моря, а та часть Атлантического океана, которая не вошла в область моделирования WRF, задавалась из реанализа CFSR. В третьем эксперименте таким же образом использовано поле ветра по модели COSMO-CLM. Во всех экспериментах поле ветра задавали на нерегулярной вычислительной сетке с изменяющимся шагом и более детальным разрешением в районе Баренцева моря. Таким образом, модель SWAN запускалась как в стандартном варианте (с использованием реанализа), так и с полем ветра, скомбинированным из двух разных источников.

Результаты исследований и их обсуждение. Оценка результатов численного моделирования поля ветра. Оценки результатов моделирования скорости ветра проводили по ближайшим к метеостанциям узлам сетки моделей WRF-ARW и COSMO-CLM. Сравнение проводилось для метеостанций Амдерма (побережье Республики Коми), Баренцбург (о. Шпицберген), Малые Кармакулы (о. Новая Земля), о. Колгуев, Териберка (побережье Кольского полуострова), о. Медвежий (рис. 1). Перечисленные метеостанции расположены в разных

частях Баренцева моря и характеризуются сильно отличающимися местными условиями. Именно этим и определен их выбор для оценки результатов моделирования.

На рис. 2 приведены результаты качественного сравнения по скорости ветра. В первом приближении хорошо видно, что в целом модели хорошо воспроизводят изменчивость скорости ветра, связанную с синоптическими процессами, период которых составляет 3–5 сут. Однако синоптическую изменчивость ветра хорошо воспроизводят и глобальные модели. Смысл использования мезомасштабных моделей состоит в детализации прогноза глобальных моделей, а также в воспроизведении субсиноптических особенностей атмосферной циркуляции (например, полярных мезоциклонов, волн на атмосферных фронтах, орographic возмущений).

Судя по всему, выбранная конфигурация моделей не позволяет воспроизводить вышеозначенные особенности, о чем наглядно свидетельствуют ошибки моделирования штормового ветра на Новой Земле (Малые Кармакулы), которые 4–5 января у обеих моделей достигают 15–20 м/с (рис. 2). Этот шторм связан с широко известным мезомасштабным эффектом новоземельской боры юго-восточного направления. Выбранное пространственное разрешение $0,15^\circ$ не позволяет успешно воспроизводить это явление. Согласно исследованиям [Блинов и др., 2013; Ефимов и др., 2000; Торопов, Шестакова, 2014] минимальный пространственный шаг, позволяющий воспроизводить явление боры на примере Новороссийска хотя бы на качественном уровне, составляет 7–10 км, а успешное моделирование явления возможно только лишь на сетке с разрешением от 2,5 км. Отдельные эпизоды значительных погрешностей на станции Амдерма, скорее всего, связаны с наблюдающимися в этом районе эффектами обтекания прибрежных возвышенностей.

Отметим, что если исключить склоновые и подветренные бури, то ошибки скорости ветра существенно уменьшаются, составляя в среднем 3–7 м/с. Также отметим, что плохое воспроизведение фёновых эффектов и склоновых бурь очевидно не оказывает существенного влияния на развитие ветрового волнения в Баренцевом море, которое определяется в первую очередь глубокими атлантическими и местными циклонами разного масштаба. Поэтому, отфильтровав местные ветры, можно получить более или менее адекватные результаты численного моделирования скорости ветра.

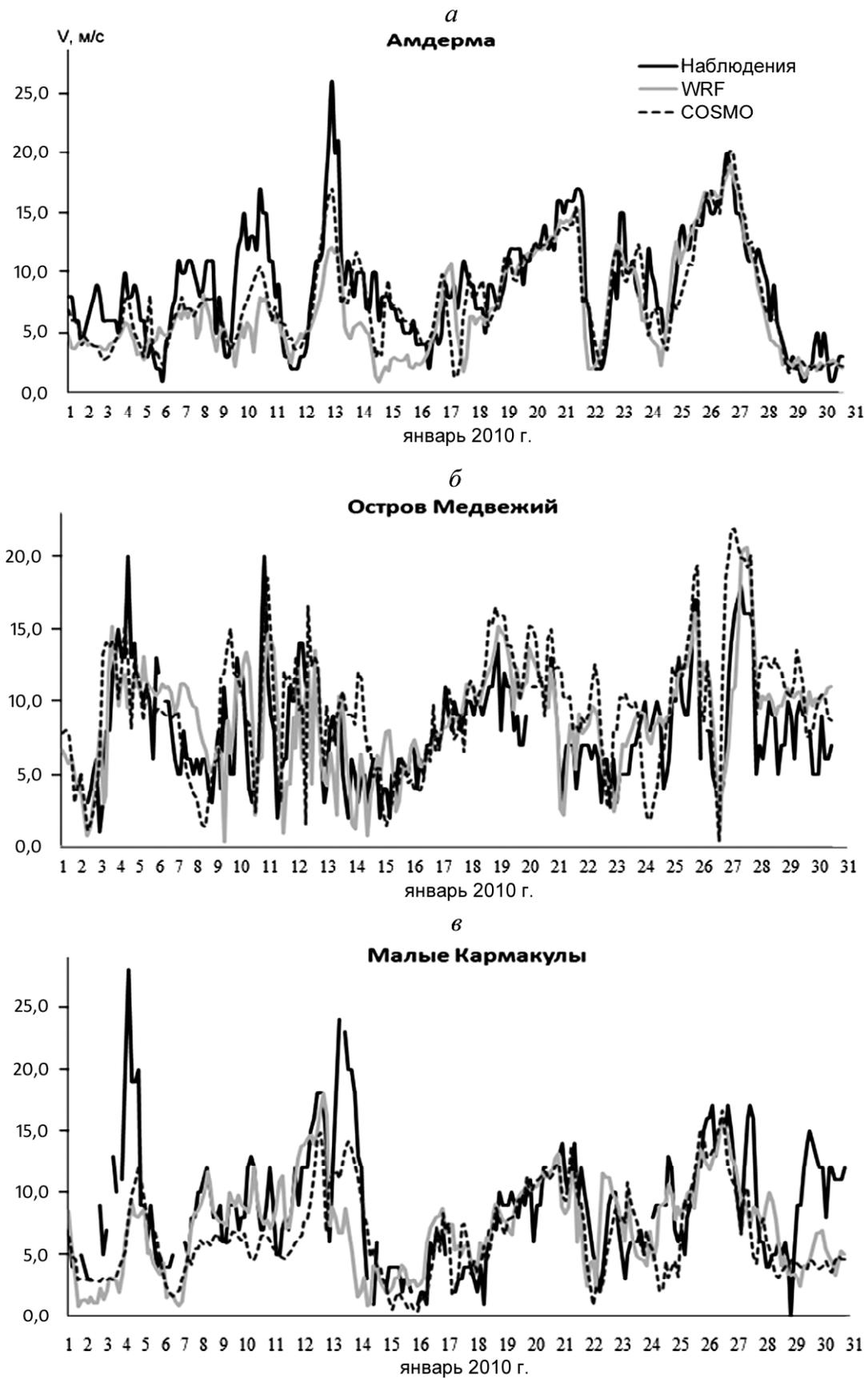


Рис. 2. Динамика скорости ветра по данным наблюдений и численного моделирования в январе 2010 г. на станциях: а – Амдерма, б – о. Медвежий, в – Малые Кармакулы
 Fig. 2. Dynamics of wind speed according to January 2010 observations and numerical modeling at the stations of: a – Amderma, b – the Medvezhy Island, c – Small Karmakuly

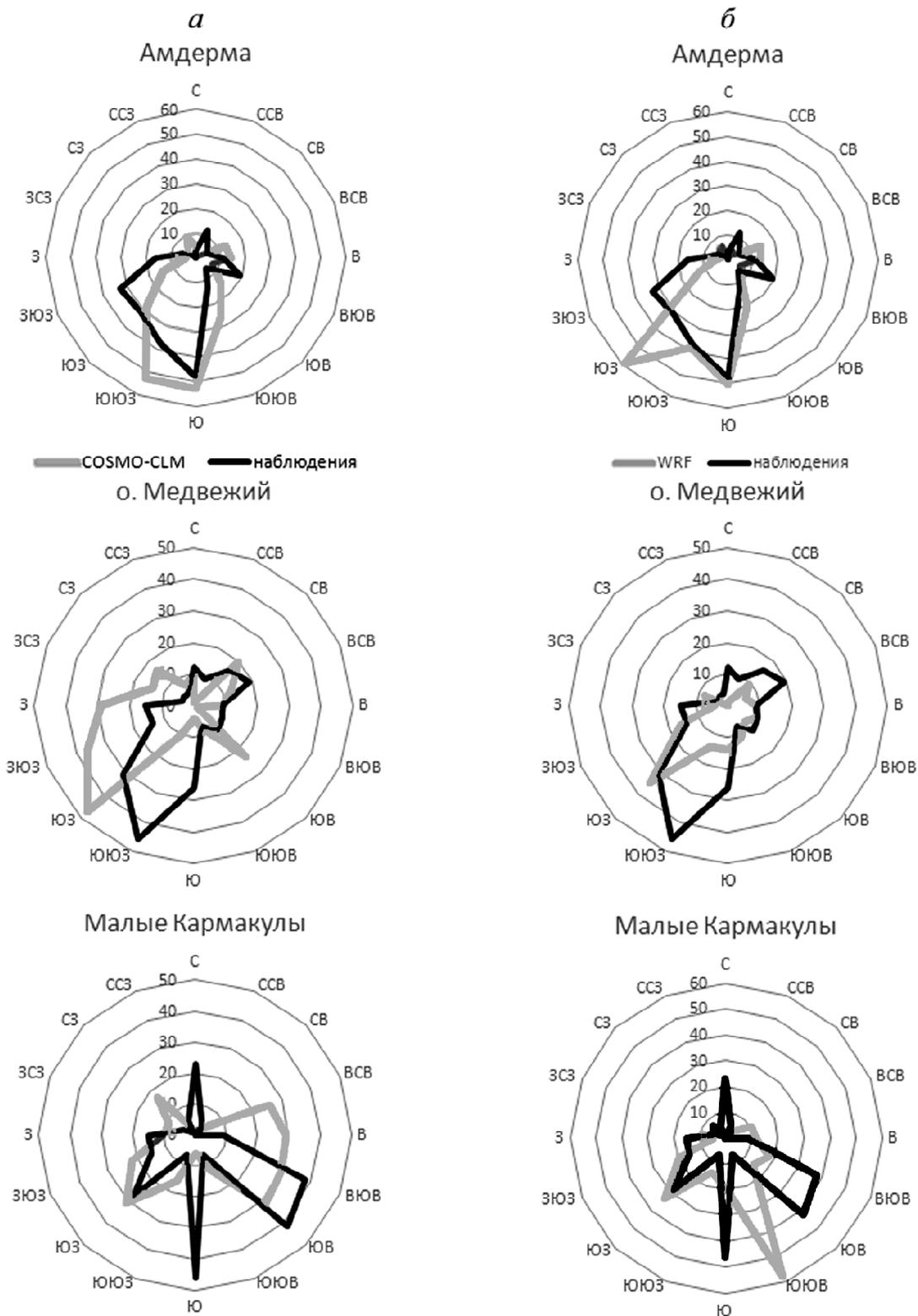


Рис. 3. Повторяемость ветров различных направлений по данным наблюдений и результатам расчетов по моделям COSMO-CLM (а) и WRF (б)

Fig. 3. Frequency of winds of particular directions by the observation data and the computation results using COSMO-CLM (a) and WRF (b) models

Эти же рассуждения в целом относятся и к анализу результатов моделирования направления ветра (рис. 3). Ошибки моделирования направления ветра в первую очередь связаны с фактором местных ветров, а также с особенностями расположения метеостан-

ций. Отметим также, что направление ветра еще чувствительнее к особенностям местоположения станции и закрытости метеоплощадки, чем скорость [Наставление..., 1985], поэтому воспроизведение направления с точностью до $22,5^\circ$ следует считать успешным.

В то же время возникает неопределенность оценки направления ветра, что связано с вышеозначенной проблемой, которая может сказаться на качестве воспроизведения волнения. Так, в [Торопов и др., 2013; Tогоров et al., 2012] показано, что ошибка моделирования направления ветра на 10° в прибрежной зоне может привести к статистически значимым погрешностям расчета волнения.

В табл. 1 приведены результаты простейших статистических оценок численного моделирования скорости ветра в выбранных 6 точках, обеспеченных натурными данными. Сравнение проводилось в моменты сроков наблюдений, то есть 8 раз в сутки. Таким образом, длина выборки результатов моделирования на каждой станции составила 248 значений, что позволяет сделать более или менее обоснованные статистические оценки.

Кроме того, учитывая, что сравнение данных метеостанции проводилось с данными в ближайшем модельном узле расчетной сетки, дополнительным источником неточностей может быть расстояние между этими точками, достигающее в отдельных случаях нескольких километров что в условиях изрезанной береговой линии и пересеченного рельефа может представлять собой значимый фактор ошибки.

В первую очередь отметим, что на уровне средних величин, как по времени, так и по всем 6 станциям, обе модели воспроизводят поле скорости ветра удовлетворительно. Так, средняя ошибка составляет в основном 1–2 м/с (по модулю), в то время как согласно официальной методике оценок точности прогноза ветра ошибка не должна превышать ±4,5 м/с

Таблица 1

Основные статистические характеристики ошибок прогноза скорости ветра

Станция	Мода (округленная), м/с		Медиана, м/с	
	WRF	COSMO-CLM	WRF	COSMO-CLM
Амдерма	-2	1	-1,6	-0,6
Баренцбург	2	0	1,1	0,7
о. Медвежий	1	2	0,9	1,9
Малые Кармакулы	-1	-2	-0,8	-1,6
Колгуев Северный	1	1	1,4	1,0
Териберка	-1	-1	-1,2	-1,7

[Наставление..., 2009]. Максимальные ошибки велики – 15–20 м/с, однако, как правило, они связаны с местными ветрами.

Величины средних и экстремальных ошибок у обеих моделей получились близкими, как и величины среднеквадратического отклонения (СКО). Анализируя эмпирические функции распределения ошибок, параметры которых приведены в табл. 2, отметим преобладание нормального и логнормального распределения, т.е. распределение ошибок закономерно, что в принципе позволяет восстанавливать вероятностное распределение экстремальных значений скорости ветра. Анализ значений коэффициента корреляции показывает, что модель COSMO-CLM несколько лучше воспроизводит временную динамику скорости ветра. Особенно ярко это проявляется в точке Малые Кармакулы, в которой при сравнении наблюдений и результатов по модели WRF коэффициент корреляции оказывается незначим. Однако при осреднении наблюдений со всех станций эта разница нивелируется – по результатам обеих

Таблица 2

Характеристики эмпирических функций распределения ошибок прогноза скорости ветра

Станция	Средняя ошибка, м/с		Максимальная ошибка, м/с		Минимальная ошибка, м/с		Среднее квадратическое отклонение, м/с		Коэффициент корреляции	
	WRF	COSMO-CLM	WRF	COSMO-CLM	WRF	COSMO-CLM	WRF	COSMO-CLM	WRF	COSMO-CLM
Амдерма	-1,9	-1,1	4,4	4,9	-13,9	-9,9	2,9	2,6	0,78	0,82
Баренцбург	1,4	0,9	14,0	12,1	-7,7	-8,9	3,6	3,4	0,51	0,57
о. Медвежий	1,2	1,6	13,7	12,5	-10,7	-16,5	3,5	3,7	0,65	0,60
Малые Кармакулы	-1,0	-2	12,8	7,6	-20,3	-19,8	4,6	4,2	0,50	0,62
Колгуев Северный	1,7	0,8	15,1	7,0	-8,9	-6,7	4,9	2,3	0,79	0,86
Териберка	-1,3	-2,1	6,5	7,5	-11,5	-13,4	3,4	3,5	0,75	0,72
Среднее по всем станциям	0,0	-0,3	11,1	8,6	-12,2	-12,5	3,8	3,3	0,70	0,70

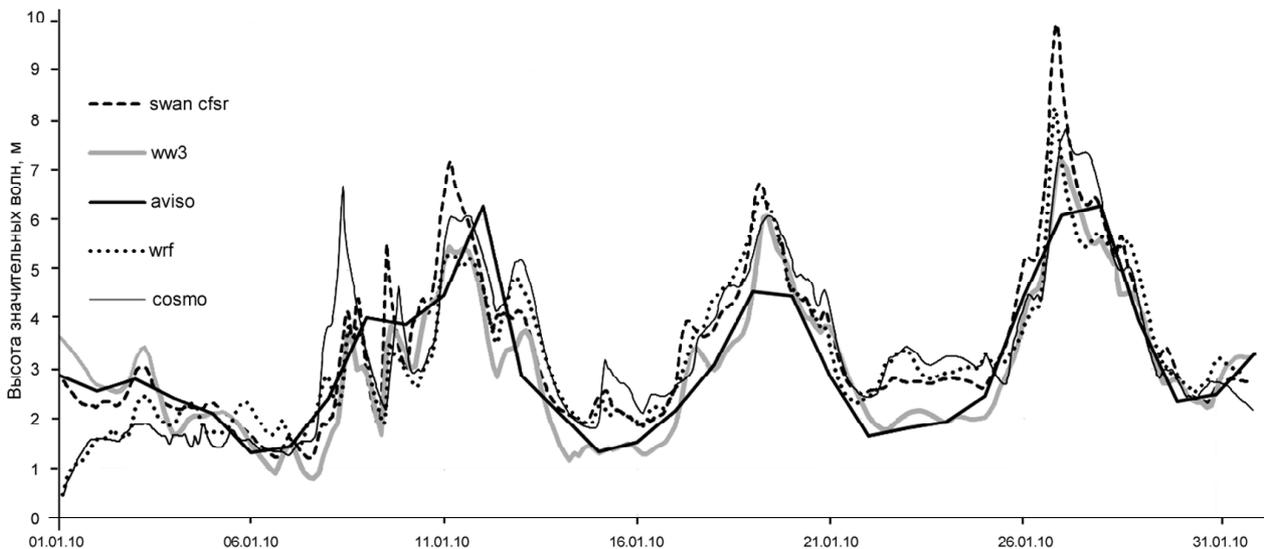


Рис. 4. Результаты моделирования высоты значительных волн в точке 74 с.ш., 34 в.д. с использованием ветра из реанализа CFSR (swan_cfsr), модели WRF (wrf), модели COSMO-CLM (cosmo) и по данным спутниковой альтиметрии (aviso)

Fig. 4. The results of simulation of the heights of significant waves at 74 N, 34 E using the wind data of the CFSR reanalysis (swan_cfsr), WRF model (wrf), COSMO-CLM model (cosmo) and the satellite altimetry (aviso)

моделей коэффициент корреляции между двумя рядами значений скорости ветра (станционному и модельному) составляет 0,7. Таким образом, для прогноза характеристик ветра обе модели можно использовать достаточно успешно, хотя при разрешении $0,15^\circ$ существенное отличие от результатов глобальной модели не отмечено (ранее показано, что средние величины ошибок воспроизведения скорости ветра в реанализе CFSR составляют 2–3 м/с).

Оценка результатов численного моделирования ветрового волнения. Поля ветра на высоте 10 м, полученные в экспериментах с мезомасштабными моделями, использованы для моделирования параметров ветрового волнения. На рис. 4 приведены результаты моделирования для одной из точек в Баренцевом море. Из-за отсутствия контактных измерений волнения для оценки качества моделирования использованы спутниковые данные AVISO и результаты уже признанной и проверенной реализации NOAA с моделью WaveWatch 3. В целом высота значительных волн, рассчитанная с применением различного форсинга, воспроизводится верно и похожа на спутниковые данные, однако нельзя не учитывать, что данные AVISO являются результатом осреднения и, скорее всего, не отражают реально наблюдаемые высоты волн на пиках. Высота волн при использовании реанализа NCEP-CFSR практически на всех экстремумах получилась больше, чем с использованием WRF и COSMO-CLM. Результаты с использованием форсингов COSMO-CLM и WRF близки к результатам реанализа NOAA, однако высота волн в большинстве случаев больше, чем у NOAA. Это может быть обусловлено использованием у NOAA более грубого форсинга. Для более обоснованного анализа ошибок модели волне-

ния необходимы ряды инструментальных измерений волнения.

Выводы:

– атмосферные модели (COSMO-CLM и WRF-ARW) в целом адекватно воспроизводят ветровой режим. Синоптическая изменчивость скорости ветра восстанавливается хорошо, в отличие от местных особенностей поля ветра. О том, что общая изменчивость воспроизводится неплохо, свидетельствуют значимые величины коэффициента корреляции (в среднем 0,7). На уровне средних значений по всей выборке и по пространству ошибки стремятся к нулю. Распределение ошибок близко к нормальному, хотя выборка недостаточно велика для того, чтобы судить об этом уверенно;

– использование форсингов COSMO-CLM и WRF при моделировании волнения дает результат, близкий к NOAA и CFSR, однако высота волн в большинстве случаев больше, чем у NOAA. Отметим, что в рамках работы ставилась задача отработать технологию воспроизведения ветрового волнения с использованием ветрового форсинга региональных атмосферных моделей, что и было успешно осуществлено;

– на основе полученной технологии моделирования волнения авторы в перспективе планируют применять различные способы улучшения результатов моделирования экстремальных ветров и волнения в Баренцевом море. К ним, в частности, относятся тонкая настройка и адаптация физических параметризаций подсеточных процессов в модели к Арктическому бассейну, например, использование полярной версии WRF-ARW, применение метода вложенных сеток с увеличением разрешения модели до нескольких километров для более детального описания мезомасштабных циркуляций и т.д.

Благодарности. Расчеты параметров ветра и волнения выполнены С.А. Мысленковым и В.С. Платоновым за счет гранта РНФ (проект №14-37-00038). Расчеты метеорологических параметров по модели WRF выполнены П.А. Тороповым за счет гранта РФФИ (проект № 14-05-91769).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блинов Д.В., Перов В.Л., Песков Б.Е., Ривин Г.С. Экстремальная бора 7–8 февраля 2012 г. в районе г. Новороссийск и ее прогноз по модели COSMO-Ru // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 4. С. 36–43.
- Воеводин В.В., Жуматий С.А., Соболев С.И. и др. Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // 2012. № 7. С. 36–39. М.: Изд. дом «Открытые системы», 2012.
- Дианский Н.А., Фомин В.В., Кабатченко И.М. и др. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1 (13). С. 57–73.
- Дымов В.И., Пасечник Т.А., Лавренов И.В. и др. Сопоставление результатов расчетов по современным моделям ветрового волнения с данными натурных измерений // Метеорология и гидрология. 2004. № 7. С. 87–94.
- Ефимов В.В., Белокопытов В.Н., Комаровская О.И. Численное моделирование ветрового волнения в северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журн. 2000. № 6. С. 36–43.
- Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Тр. Гос. океанографического института. 2014. Т. 215. С. 90–101.
- Макитас А.П., Рубинштейн К.Г., Бычкова В.И. Предварительная оценка качества воспроизведения метеорологических параметров в Арктическом районе полярной версией модели WRF // Тр. ГУ Гидрометцентра РФ. 2009. Вып. 344.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 300 с.
- Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Росгидромет, РД 52.27.724-2009. Обнинск: «ИГ-СОЦИН», 2009. 62 с.
- Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях: Науч.-метод. пособие / Под ред. Е.С. Нестерова. М.: Исслед. группа «Социальные науки», 2013. 295 с.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. 213 с.
- Торопов П.А. Оценка качества воспроизведения моделями общей циркуляции атмосферы климата Восточно-Европейской равнины // Метеорология и гидрология. 2005. № 5. С. 5–21.
- Торопов П.А., Мысленков С.А., Самсонов Т.Е. Численное моделирование Новороссийской боры и связанного с ней опасного ветрового волнения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 2. С. 38–46.
- Торопов П.А., Шестакова А.А. Оценка качества моделирования новороссийской боры с помощью WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2014. № 7. С. 38–51.
- Arctic Syntool. URL: <http://arctic.solab.rshu.ru> (дата обращения: 11.04.2015).
- Aviso Satellite data. URL: <http://www.aviso.oceanobs.com> (дата обращения: 13.04.2015).
- Boehm U., Kuecken M., Ahrens W. et al. CLM – The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications // COSMO Newsletters. 2006. N 6. P. 225–235.
- Chen F., von Storch H. Trends and variability of North Pacific Polar Lows // Advances in Meteorology. 2013. Article ID 170387. 11 p.
- CISL Research Data Archive. URL: <http://rda.ucar.edu> (дата обращения: 11.04.2015).
- CLM-Community homepage. URL: <http://www.clm-community.eu> (дата обращения: 11.05.2015).
- COSMO model description page. URL: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm> (дата обращения: 11.05.2015).
- Dosio A., Panitz H.-J., Schubert-Frisius M., Lüthi D. Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: evaluation over the present climate and analysis of the added value // Clim. Dyn. 2015. Vol. 44, Iss. 9–10. P. 2637–2661.
- Dykes J.D., Wang D.W., Book J.W. An evaluation of high-resolution operational wave forecasting system in the Adriatic Sea // J. Marine Systems. 2009. Vol. 78. P. 255–271.
- Giorgi F., Jones C., Asrar Gh.R. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework // WMO Bull. 2009. Vol. 58 (3). P. 175–183.
- Gusdal Y., Carrasco A., Furevik B.R., Sætra R. Validation of the operational wave model WAM and SWAN // Oceanography. 2009. Rep. N 18. 28 p.
- Haas R., Pinto J.G. A combined statistical and dynamical approach for downscaling large-scale footprints of European windstorms // Geoph. Res. Lett. Vol. 39. L23804.
- Janssen P., Abdalla S., Hersbach H., Bidlot J.-R. Error estimation of buoy, satellite, and model wave height data // J. Atmosphere and Oceanic Technology. 2006. Vol. 24, iss. 9. P. 1665–1677.
- Lindsay R., Wenshanan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic // J. Climate. 2014. Vol. 27. P. 2588–2606.
- NOAA Wave Watch 3. URL: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves> (дата обращения: 11.05.2015).
- Reistad M., Breivik O., Haakenstad H. et al. A high-resolution hindcast of wind and waves for the North Sea, the Norwegian Sea and the Barents Sea // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. C05019.
- Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. The NCEP Climate Forecast System version 2 // J. Climate. 2014. Vol. 27(6). P. 2185–2208.
- Schoch G.C., Chao Y., Colas F. et al. An ocean observing and prediction experiment in Prince William Sound, Alaska // Bull. of the Amer. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 92, iss. 8. P. 997–1007.
- SWAN Technical Documentation, SWAN Cycle III ver. 40.51A. Vol. 98. Netherlands, Delft, University of Technology, 2007.
- Toropov P.A., Myslenkov S.A., Shestakova A.A. Numerical simulation of Novorossiysk bora and related wind waves using the WRF-ARW and SWAN models // Russ. J. Earth Sci. 2012. Vol. 12. ES6001. doi: 10.2205/2012ES000524.
- Van Pham T., Brauch J., Dieterich C. et al. New coupled atmosphere-ocean-ice system COSMO-CLM/NEMO: assessing air temperature sensitivity over the North and Baltic Seas // Oceanologia. 2014. Vol. 56 (2). P. 167–189. doi: 10.5697/oc.56-2.167.
- Varentsov M., Verezemskaya P., Baranyuk A. et al. Investigation of polar mesocyclones in Arctic Ocean using COSMO-CLM and WRF numerical models and remote sensing data // Geophysic. Res. Abstr. 2015. Vol. 17. EGU2015-7631.
- WRF model homepage. URL: <http://www.wrf-model.org/index.php> (дата обращения: 11.05.2015).

Поступила в редакцию 18.06.2015
Принята к публикации 28.10.2015

S.A. Myslenkov¹, V.S. Platonov²,
P.A. Toropov³, A.A. Shestakova⁴

SIMULATION OF STORM WAVES IN THE BARENTS SEA

The implementation of spectral wave model SWAN for the Barents Sea, including the Northern part of the Atlantic Ocean was presented. Computations were performed by using special unstructured mesh, which has spatial resolution in the Atlantic Ocean is 1°, in the Barents – 0,5°. The wind forcing data from reanalysis NCER-CFSR and from mesoscale models WRF-ARW and COSMO-CLM used.

The simulation results quality was provided by comparing modeled significant wave with satellite data. Numerical calculations are performed for January 2010, because in this time there was a series of storms. For compare we also used the results of AARI-PD2 wave model which implemented in the AARI. It is shown that both models are generally adequately reproduce the wind regime at points of stations.

Synoptic variability of wind speed simulated well, but local features simulated much worse. The values of correlation coefficient (average 0.7) is significant and evidence that the overall variability simulated well, but they do not assure good quality of modeling wind waves. Wind wave modeling results revealed that in the current configuration, forcing COSMO-CLM and WRF produces a results close to the NOAA and NCEP-CFSR.

Key words: wind waves, SWAN, non-regular grid, WRF, COSMO, CFSR, the Barents Sea.

Acknowledgements. Parameters of wind and waves were calculated by S.A.Myslenkov under financial support of the Russian Science Foundation (project No 14-37-00038). Meteorological parameters according to the WRF model were calculated by P.A.Toropov under financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No 14-05-91769).

REFERENCES

- Arctic Syntool. URL: <http://arctic.solab.rshu.ru> (Accessed: 11.04.2015) (in Russian).
- Aviso Satellite data. URL: <http://www.avisooceanobs.com> (Accessed: 13.04.2015).
- Blinov D.V., Perov V.L., Peskov B.E., Rivin G.S. Jekstremal'naja bora 7–8 fevralja 2012 g. v rajone g. Novorossijsk i ee prognoz po modeli COSMO-Ru [Extreme bora of February 7–8, 2012, in the Area of Novorossiysk and its forecast with the COSMO-Ru model], Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5. Geografija, 2013, no 4. pp. 36–43 (in Russian).
- Boehm U., Kuecken M., Ahrens W. et al. CLM – The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications // COSMO Newsletters. 2006, no 6, pp. 225–235.
- Chen F., von Storch H. Trends and variability of North Pacific Polar Lows // Advances in Meteorology. 2013. Article ID 170387. 11 p.
- CISL Research Data Archive. URL: <http://rda.ucar.edu> (Accessed: 11.04.2015).
- CLM-Community homepage. URL: <http://www.clm-community.eu> (Accessed: 11.05.2015).
- COSMO model description page. URL: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm> (Accessed: 11.05.2015).
- Dianskij N.A., Fomin V.V., Kabatchenko I.M. i dr. Vosproizvedenie cirkuljacji Karskogo i Pechorskogo morej s pomoshh'ju sistemy operativnogo diagnoza i prognoza morskoy dinamiki [Simulation of circulation of the Kara and Pechora Seas through the system of express diagnosis and prognosis of marine dynamics], Arktika: jekologija i jekonomika, 2014, no 1 (13), pp. 57–73 (in Russian).
- Dosio A., Panitz H.-J., Schubert-Frisius M., Lüthi. D. Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: evaluation over the present climate and analysis of the added value // Clim. Dyn. 2015, Vol. 44, Iss. 9–10. P 2637–2661.
- Dykes J.D., Wang D.W., Book J.W. An evaluation of high-resolution operational wave forecasting system in the Adriatic Sea // J. Marine Systems, 2009, Vol. 78, pp. 255–271.
- Dymov V.I., Pasechnik T.A., Lavrenov I.V. i dr. Sopotavlenie rezul'tatov raschetov po sovremennym modeljam vetrovogo volnenija s dannymi naturnyh izmerenij [Comparison of modern wind-wave model results with field measurements], Meteorologija i gidrologija, 2004, no 7, pp. 87–94 (in Russian).
- Efimov V.V., Belokopytov V.N., Komarovskaja O.I. Chislennoe modelirovanie vetrovogo volnenija v severo-zapadnoj chasti Chernogo morja [Numerical modeling of wind waves in the northwestern part of the Black Sea], Morskoy gidrofizicheskij zhurn, 2000, no 6, pp. 36–43 (in Russian).
- Giorgi F., Jones C., Asrar Gh.R. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework // WMO Bull. 2009, Vol. 58 (3), pp. 175–183.
- Gusdal Y., Carrasco A., Furevik B.R., Sétra Ř. Validation of the operational wave model WAM and SWAN // Oceanography. 2009. Rep. N 18. 28 p.
- Haas R., Pinto J.G. A combined statistical and dynamical approach for downscaling large-scale footprints of European windstorms // J. Geoph. Res. Lett. Vol. 39. L23804.
- Janssen P., Abdalla S., Hersbsch H., Bidlot J-R. Error estimation of buoy, satellite, and model wave height data // J. Atmosphere and Oceanic Technology, 2006. Vol. 24, iss. 9. P. 1665–1677.
- Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic // J. Climate. 2014. Vol. 27. P. 2588–2606.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Research Scientist; *e-mail*: stasocean@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Research Scientist, Ph.D. in Geography; *e-mail*: vplatonov86@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; *e-mail*: tormet@inbox.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Post-Graduate Student; *e-mail*: anna@sarez-lake.ru

- Makshtas A.P., Rubinshtejn K.G., Bychkova V.I.* Predvaritel'naja ocenka kachestva vosproizvedenija meteorologicheskikh parametrov v Arkticheskom rajone poljarnoj versiej modeli WRF [Preliminary assessment of the quality of reproduction of meteorological parameters in the Arctic region by polar version of WRF model], Tr. GU Gidrometcentra RF, 2009, Vyp. 344 (in Russian).
- Nastavlenie gidrometeorologicheskim stancijam i postam. Vyp. 3, ch. 1. Meteorologicheskie nabljudenija na stancijah. [Manual on the hydrometeorological stations and posts], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 300 p. (in Russian).
- Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshhego naznachenija [Manual on short-term weather forecasts]. Rosgidromet, RD 52.27.724-2009, Obninsk, «IG-SOCIN», 2009, 62 p. (in Russian).
- NOAA Wave Watch 3. URL: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves> (Accessed: 11.05.2015).
- Reistad M., Breivik O., Haakenstad H.* et al. A high-resolution hindcast of wind and waves for the North Sea, the Norwegian Sea and the Barents Sea // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. C05019.
- Rezhim, diagnoz i prognoz vetrovogo volnenija v okeanah i morjah: Nauch.-metod. Posobie / Pod red. E.S. Nesterova [Climate, analysis and forecast of wind waves in the oceans and seas: scientific method. Allowance, Ed. E.S. Nesterov], Moscow, Issled. gruppa «Social'nye nauki», 2013, 295 p. (in Russian).
- Saha S., Moorthi S., Wu X.* et al. The NCEP Climate Forecast System version 2 // *J. Climate.* 2014. Vol. 27(6). P. 2185–2208.
- Schoch G.C., Chao Y., Colas F.* et al. An ocean observing and prediction experiment in Prince William Sound, Alaska // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 92, Iss. 8. P. 997–1007.
- Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volnenija Barenceva, Ohotskogo i Kaspijskogo morej [Reference data of wind and waves climate of the Barents, Okhotsk Sea and Caspian Sea], SPb.: Rossijskij morskij registr sudohodstva, 2003, 213 p. (in Russian).
- SWAN Technical Documentation, SWAN Cycle III ver. 40.51A // Netherlands, Delft, University of Technology, 2007. Vol. 98.
- Toropov P.A.* Ocenka kachestva vosproizvedenija modeljami obshhej cirkuljacii atmosfery klimata Vostochno-Evropskoj ravniny [Estimation of quality of simulation by atmospheric general circulation models of climate in the East European plain], *Meteorologija i gidrologija*, 2005, no 5, pp. 5–21 (in Russian).
- Toropov P.A., Myslenkov S.A., Samsonov T.E.* Chislennoe modelirovanie Novorossijskoj bory i svjazannogo s nej opasnogo vetrovogo volnenija [Numerical modeling of bora in Novorossiysk and associated wind waves], *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5, Geografija*, 2013, no 2, pp. 38–46 (in Russian).
- Toropov P.A., Myslenkov S.A., Shestakova A.A.* Numerical simulation of Novorossiysk bora and related wind waves using the WRF-ARW and SWAN models, *Russ. J. Earth Sci.* 2012, Vol. 12. ES6001. doi: 10.2205/2012ES000524.
- Toropov P.A., Shestakova A.A.* Ocenka kachestva modelirovanija novorossijskoj bory s pomoshh'ju WRF-ARW [Quality assessment of Novorossiysk bora simulation by the WRF-ARW model], *Meteorologija i gidrologija*, 2014, no 7, pp. 38–51 (in Russian).
- Van Pham T., Brauch J., Dieterich C.* et al. New coupled atmosphere-ocean-ice system COSMO-CLM/NEMO: assessing air temperature sensitivity over the North and Baltic Seas // *Oceanologia.* 2014. Vol. 56 (2). P. 167–189. doi: 10.5697/oc.56-2.167.
- Varentsov M., Verezemskaya P., Baranyuk A.* et al. Investigation of polar mesocyclones in Arctic Ocean using COSMO-CLM and WRF numerical models and remote sensing data // *Geophysic. Res. Abstr.* 2015. Vol. 17. EGU2015-7631.
- Voevodin V.I., Zhumatij S.A., Sobolev S.I.* et al. Praktika superkomp'jutera «Lomonosov» [Practice of «Lomonosov» Supercomputer], 2012, no 7, pp. 36–39. M.: Izd. dom «Otkrytye sistemy», 2012 (in Russian).
- WRF model homepage. URL: <http://www.wrf-model.org/index.php> (Accessed: 11.05.2015).
- Zelen'ko A.A., Strukov B.S., Resnjanskij Ju.D., Martynov S.L.* Sistema prognozirovanija vetrovogo volnenija v Mirovom okeane i morjah Rossii [The forecast system of wind waves in the oceans and seas of Russia], Tr. gos. okeanograficheskogo instituta, 2014, Vol. 215, pp. 90–101 (in Russian).

Received 18.06.2015

Accepted 28.10.2015