

---



---

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**


---



---

УДК 551.466, 551.559

**ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ  
КАРСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ  
КОНФИГУРАЦИИ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ**

**В.С. Платонов<sup>1</sup>, С.А. Мысленков<sup>2</sup>, В.С. Архипкин<sup>3</sup>, А.В. Кислов<sup>4</sup>**

<sup>1-4</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*

<sup>1</sup> *Кафедра метеорологии и климатологии, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: vplatonov86@gmail.com*

<sup>2</sup> *Кафедра океанологии, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: stasocan@gmail.com*

<sup>3</sup> *Кафедра океанологии, канд. геогр. наук, доц.; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com*

<sup>4</sup> *Зав. кафедрой метеорологии и климатологии, д-р геогр. наук, проф.; e-mail: avkisllov@mail.ru*

Прибрежные зоны в Арктике характеризуются разнообразием опасных гидрометеорологических явлений, включая большие скорости ветра, штормовое волнение и нагоны. Обилие островов, горных хребтов и изрезанная береговая линия в Карском море способствуют возникновению мезомасштабных атмосферных циркуляций, что во многом определяет структуру прибрежных течений. В условиях разреженной наблюдательной сети для воспроизведения и исследования гидрометеорологических характеристик в данной работе применяется высокоразрешающее моделирование полей ветра, волнения, уровня и течений. Проведены эксперименты с мезомасштабной негидростатической атмосферной моделью COSMO-CLM для региона Карского моря с горизонтальным разрешением ~12 и ~3 км. В отличие от глобального реанализа NCEP/CFSR, модель с разрешением ~3 км оказалась способна воспроизводить такие явления, как мысовые струи, подветренные бури и вихревые цепочки в шхерах различного размера. Это является важным аспектом при использовании полей ветра COSMO-CLM в качестве форсинга при моделировании волнения и нагонов. Для моделирования волнения использована модель WAVEWATCH III, а для уровня и течений – ADCIRC. При моделировании волнения с использованием полей ветра высокого разрешения при ветрах с моря на берег отличия от реализации, использующей реанализ NCEP/CFSR, минимальны, а для ветра с берега на море влияние локальных ветровых условий вносит существенные изменения. При моделировании уровня моря с использованием полей ветра высокого разрешения в узких заливах и губах наблюдаются существенные отличия от реализации на основе реанализа NCEP/CFSR. Наибольшие рассчитанные величины нагонов в Карском море отмечаются в южной части Обской губы – до 2,5 м. Формирование нагонов в Обской губе происходит значительно чаще (примерно в 2 раза), чем в Байдаракской. Многолетние тренды изменения количества нагонов находятся в противофазе – в период с 1995 по 2005 гг. в Байдаракской губе наблюдалось наименьшее количество нагонов, в то время как в Обской губе, наоборот, наибольшее.

**Ключевые слова:** гидродинамическое моделирование высокого разрешения, ветровое волнение, ветровые нагоны, COSMO-CLM, WAVEWATCH III, ADCIRC, Карское море

### ВВЕДЕНИЕ

Климат и экстремальные погодные явления в Арктике привлекают все большее внимание в связи арктическим усилением глобального потепления и сопутствующими изменениями природной среды, в частности рост температуры здесь наибольший на всем земном шаре [Johannessen, 2016]. Основной вклад в «арктическое усиление» глобального потепления вносят динамические процессы в атмосфере, осуществляющие перенос тепла к полюсу, «атлантификация» Северного Ледовитого океана (СЛО) и сокращение площади ледяного покрова в летний период [Polyakov et al., 2017; Vihma, 2014;

Vekryaev et al., 2010]. Освобождение поверхности СЛО ото льда также благоприятствует увеличению повторяемости экстремальных ветров и ветрового волнения [Francis, Vavrus, 2012].

Карское море и прилегающий материковый регион во многих чертах отражают эти основные особенности. Потепление в регионе Баренцева и Карского морей имеет не только региональный климатический эффект, но и через обратные связи в климатической системе оказывает влияние на Арктическое колебание [Yang et al., 2016], температурный режим над Евразией и, в частности, Сибирским регионом [Petoukhov, Semenov, 2010; Outten, Esau, 2012] и др.

Прибрежные районы в Арктической зоне характеризуются наиболее опасными гидрометеорологическими явлениями (ОЯ), обусловленными сочетанием крупномасштабных гидродинамических условий, особенностей подстилающей поверхности и мезомасштабных циркуляций (каньонные ветры, мысовые струи, барьерные эффекты, полярные мезоциклоны, подветренные бури [Moore, Renfrew, 2005; Shestakova et al., 2020]). Например, развитие и перемещение полярных мезоциклонов может вносить существенный вклад в формирование значительного волнения и штормовых нагонов [Дианский и др., 2019; 2020] в морях западного сектора Российской Арктики. Такие ОЯ, как экстремальные скорости ветра, волнение и штормовые нагоны в узких заливах и губах оказывают разрушительное воздействие на прибрежную портовую, транспортную инфраструктуру, объекты шельфовой нефте- и газодобычи, приводят к значительному материальному ущербу, а иногда и человеческим жертвам.

Скудость наземной наблюдательной метеорологической сети в Арктике, недостаточность имеющихся средств измерений, а также нерегулярность детализированной спутниковой информации приводят к необходимости использования ориентированных на процессы мезомасштаба данных моделирования, в том числе и высокого разрешения. Данные глобальных реанализов – например, ERA-Interim [Dee et al., 2011], ERA-5 [Hersbach et al., 2020], NCEP/CFSR [Saha et al., 2010] – имеют слишком грубое пространственное разрешение, чтобы адекватно воспроизводить метеорологические процессы в прибрежных зонах, а также опасные явления, обусловленные мезомасштабными и конвективными процессами. Отдельно стоит упомянуть Арктический реанализ (Arctic System Reanalysis, ASR v1 и v2) [Bromwich et al., 2018] и COSMO-CLM Russian Arctic hindcast [Platonov, Varentsov, 2021], которые являются единственными на данный момент примерами создания региональных модельных архивов в Арктике в длительных (17 и 37 лет соответственно) временных масштабах. Однако даже шаг сетки в 12–15 км позволяет воспроизводить явления с горизонтальным масштабом лишь порядка 50 км и более, что, безусловно, исключает из возможного анализа большой спектр опасных процессов мезо- $\alpha$  и частично мезо- $\beta$  масштаба.

Большинство работ, посвященных ветровому волнению в Карском море, выполнено на основе результатов моделирования либо анализа спутниковых данных, т. к. прямые измерения практически отсутствуют. В работах [Дианский и др., 2014; Stopa et al., 2016; Duan et al., 2019; Myslenkov et al., 2021] рассмотрены основные особенности моделирования волнения в Карском море. В некоторых работах отмечено,

что площадь ледяного покрова в последнее десятилетие (2007–2018) уменьшается [Serreze, Stroeve, 2015], а высота волн увеличивается [Li et al., 2019].

Работ, посвященных непосредственному исследованию штормовых нагонов в Карском море, очень мало. В работе [Добровольский, Залогин, 1982] указано, что сгонно-нагонные колебания уровня в Карском море на материковом берегу могут быть более 1 м, а в заливах и губах в сезонах безо льда превышать 2 м. В статьях [Ашик и др., 1989; Ашик, 1994, 1997] основной упор делается лишь на численный прогноз сгонно-нагонных колебаний без дополнительных исследований механизмов их возникновения. При этом используемая расчетная сетка с большим пространственным шагом не дает возможности учесть влияние небольших островов и изрезанности береговой линии на динамику нагона. В других работах, где затрагиваются некоторые аспекты колебаний уровня в Карском море, сгонно-нагонные явления отдельно не рассматриваются [Дианский и др., 2014; Борисов, Раевский, 2016].

Наблюдения за уровнем в Карском море в настоящее время ведутся всего лишь на нескольких гидрометеорологических постах, удаленных друг от друга на сотни километров [Атлас..., 2007]. Учитывая сильную изрезанность береговой линии, наличие большого количества островов, архипелагов, фьордов, заливов и губ, а также большую временную дискретность наблюдений за уровнем моря на этих постах, не представляется возможным изучение закономерностей формирования штормовых нагонов и их пространственно-временной изменчивости по этим данным.

При этом именно в прибрежных зонах гидрометеорологическая информация высокого разрешения наиболее важна и востребована для широкого круга потребителей, строительства инфраструктуры, обеспечения морских операций в Арктике и других задач. С учетом растущего числа ОЯ [Cohen et al., 2018] и перспектив по освоению арктического побережья и Северного морского пути особую актуальность приобретает задача обеспечения региона детализированной гидрометеорологической информацией с горизонтальным разрешением по крайней мере в несколько километров. Основным методом исследования мезомасштабной динамики атмосферы, волнения и физических механизмов формирования опасных явлений, штормовых нагонов и их изменчивости в Карском море несомненно является использование высокоразрешающего численного моделирования.

Основной целью данной работы является исследование возможностей высокоразрешающего гидродинамического моделирования воспроизводить особенности атмосферной циркуляции, волнения

и штормовых нагонов в прибрежных зонах на примере такого сложного объекта, как Карское море, в условиях неоднородностей подстилающей поверхности на различных пространственных масштабах. В работе выполнен анализ полей ветра и волнения, нагонов в шхерах и заливах пространственного масштаба 2–15 км.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Моделирование атмосферы моделью COSMO-CLM.** В качестве основного инструмента моделирования динамики атмосферы использовалась негидростатическая модель COSMO-CLM (версия 5.0) [Böhm et al., 2006; Rockel, Geyer, 2008]. Эта региональная мезомасштабная модель разрабатывается одноименным консорциумом (Consortium for Small-scale Modeling), включающим в себя национальные службы прогноза погоды ряда стран, развитие климатической версии модели осуществляется в рамках международного научного сообщества CLM-Community [The Climate..., 2005].

Модель COSMO-CLM (CCLM) основана на уравнениях Рейнольдса, описывающих динамику сжимаемой жидкости во влажной атмосфере. Модельные уравнения решаются на широтно-долготной сетке со смещенным положением Северного полюса, за счет чего минимизируется проблема сходимости меридианов в точке полюса. Численная схема реализована на сетке Аракавы типа C [Arakawa, Lamb, 1977]. В роли вертикальной координаты выступает гибридная координата Гал-Чена  $\mu$  ( $\sigma$ - $z$ -система), представленная аналогом  $\sigma$ -координаты от земной поверхности ( $Z_0$ ) до промежуточного уровня  $Z_F$ , а выше уровня  $Z_F$  – обычной  $Z$ -координатой [Gal-Chen, Somerville, 1975; Schär et al., 2002]. Существует возможность использования «спектрального наджинга» [Storch von et al., 2000]. Более подробное описание модели и ее документация приведены в [Cocle..., 2003].

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). Это важно в том числе для корректного воспроизведения полей приземного ветра, которые являются основным предметом исследования в данной работе. Увеличение вертикального разрешения модели способствует более успешному воспроизведению, в частности, экстремальных скоростей ветра и порывов, алгоритм расчета которых в модели достаточно прост [Schulz, Heise, 2003; Platonov, Varentsov, 2018].

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  $0,7^\circ$  (~75 км) [Dee et al., 2011], а на вложенной расчетной области использовались выходные данные моделирования на базовой расчетной области с уменьшением горизонтального разрешения и района моделирования. Базовая расчетная область с разрешением  $0,12^\circ$  (~13 км) охватывает, помимо Карского моря, Северную Атлантику, Баренцево море и приполярные районы. Такой охват учитывает преобладание западных процессов атмосферной циркуляции в регионе, а также распространение и влияние волнения и зыби в Атлантике на процессы в Карском море. Вложенная область моделирования с разрешением  $0,03^\circ$  (~2,8–3 км) полностью охватывает акваторию Карского моря, имея также некоторое распространение на запад. Карта с границами расчетных областей приведена на рисунке 1. Далее в тексте эксперименты на расчетных областях с разрешением ~13 и ~3 км носят названия CCLM13 и CCLM3.

Эксперименты по описанной схеме проводились для двух периодов: август–октябрь 2012 г. и июль–сентябрь 2014 г. Все расчеты выполнялись на СК «Ломоносов-2» вычислительного комплекса МГУ [Voevodin et al., 2019]. Конфигурация модели была выбрана из различных вариантов на основе верификации по скорости ветра на метеорологических станциях Карского моря [Platonov, Kislov, 2020]. В окончательном варианте, рассматриваемом далее, использовался «спектральный наджинг» [Storch von et al., 2000] и увеличенный шаг по времени – 100 секунд. Данные о концентрации морского льда и температуре поверхности океана брались из данных реанализа ERA-Interim и обновлялись каждые шесть часов.

**Моделирование ветрового волнения моделью WAVEWATCH III.** Для расчета параметров ветрового волнения в Карском море использовалась спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III версии 6.07 [Tolman, 2019]. 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.

Для генерации волн использована схема ST6, для расчета нелинейных взаимодействий – схема DIA, для учета влияния льда – схема IC0. Для учета воздействия придонного трения используется схема 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 составляет 15 минут, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии – 60 секунд, шаг по времени для передачи энергии по спектру – 450 секунд.

При моделировании волнения проводились эксперименты с использованием данных о ветре из результатов модели COSMO-CLM с разрешением  $\sim 3$  и  $\sim 13$  км (далее в тексте обозначены как WW3-CCLM13 и WW3-CCLM3), а также данных о ветре и концен-

трации льда с шагом по времени 1 час из реанализов NCEP/CFSR (1979–2010) с пространственным разрешением  $\sim 0,3^\circ$  и NCEP/CFSv2 (2011–2019) с разрешением  $\sim 0,2^\circ$  (далее в тексте обозначены как WW3-CFSR). 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. 2). Для Карского моря шаг составляет 10 км в открытом море и 700 м у берега. Более подробное описание конфигурации модели и особенности ветрового волнения в Карском и Баренцевом морях изложены в работах [Myslenkov et al., 2021; Мысленков, Маркина, 2018; Мысленков и др., 2017].

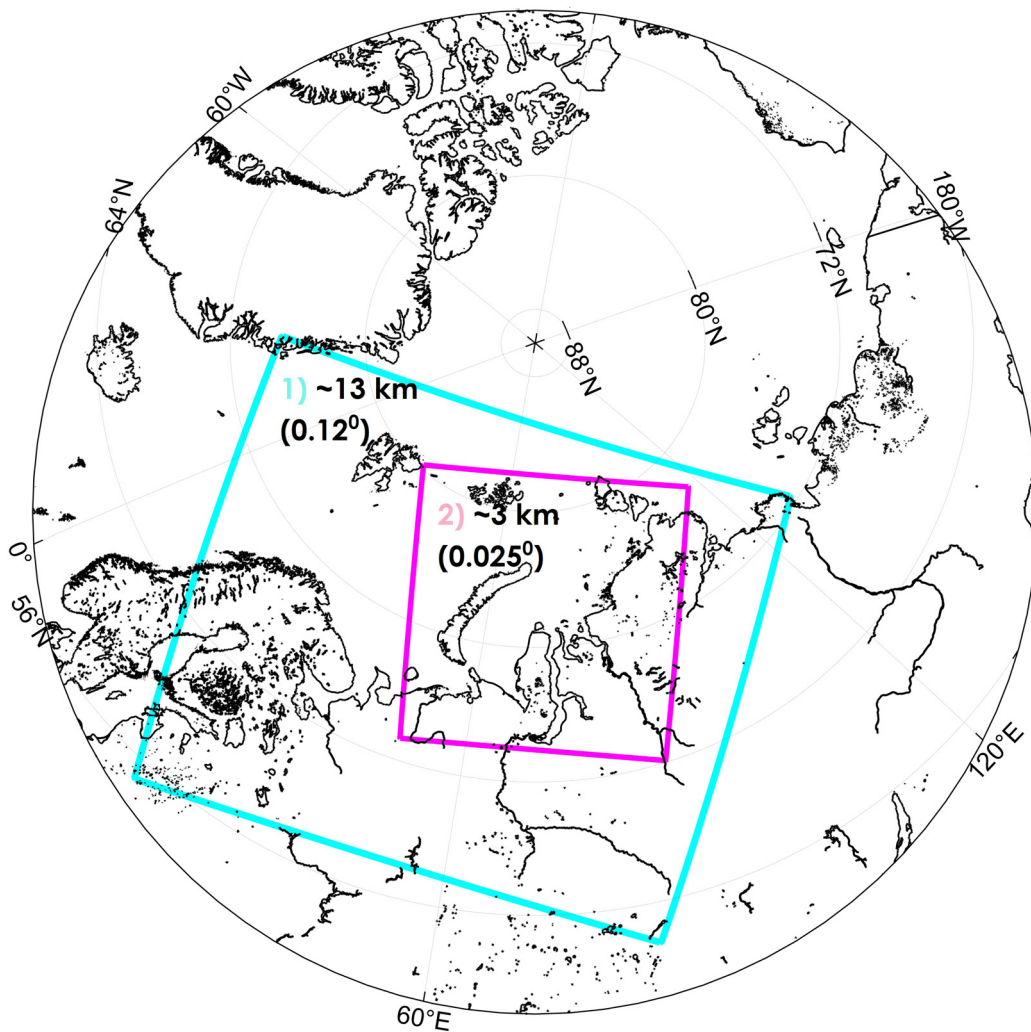


Рис. 1. Схема расположения границ базовой (1) и вложенной (2) расчетных областей COSMO-CLM

Fig. 1. Location of the COSMO-CLM base (1) and nested (2) domains' boundaries

Оценка качества моделирования скорости ветра и волнения с использованием различного ветрового форсинга производилась на основе спутниковых данных о скорости ветра и высоте волн из базы Integrated Marine Observing System (IMOS) [Young, Ri-

bal, 2019] и сравнения их с данными моделирования в ближайшем узле (в пределах 8 км). Статистические характеристики сравнения данных моделирования скорости ветра и высоты волн со спутниковыми данными за период сентябрь–октябрь 2012 г.



приведены в таблице 1. Также результаты моделирования CCLM13 и CCLM3 верифицировались по данным наблюдений метеорологических станций в пределах акватории Карского моря (табл. 2). Результаты сравнений показывают, что реализации CCLM3 и CCLM13 с использованием спектрального наджинга не уступают по качеству реанализу CFSR, как правило, ошибки близки либо несколько меньше. Учитывая, что CCLM3 воспроизводит различные локальные неоднородности в поле ветра с учетом подстилающей поверхности с высоким разрешением [Platonov, Kislov, 2020; Kislov и др., 2018], то использование этого форсинга, вероятно, более целесообразно для прибрежной зоны. Однако, из-за отсутствия данных инструментальных измерений по высоте волн в прибрежной зоне это крайне сложно подтвердить количественно.

**Моделирование уровня моря и течений моделью ADCIRC.** Для расчетов параметров штормовых нагонов в Карском море была выбрана модель ADCIRC (ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine waters [Blain et al., 2002]). Выбор этой модели обусловлен несколькими причинами: 1) она учитывает практически все силы, формирующие нагоны, а также факторы, влияющие на высоту нагонов; 2) она используется в оперативной практике США для прогноза штормовых нагонов в Мексиканском заливе и у восточного побережья США [Coastal..., 2021]; 3) данные наблюдений за уровнем моря соответствуют результатам моделирования в разных морях, омывающих Россию [Иванова и др., 2015; Кораблина и др., 2017; Pavlova et al., 2020]; 4) модель использует неструктурную расчетную сетку с разным пространственным шагом, что по-

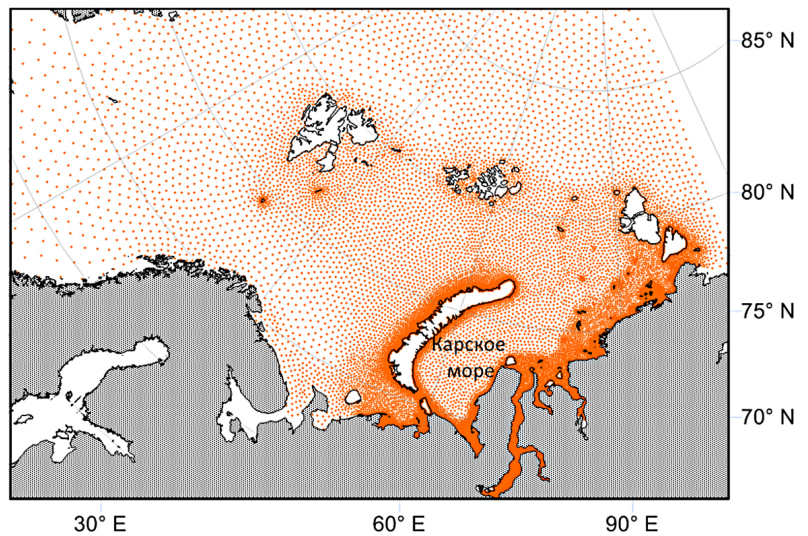


Рис. 2. Неструктурная сетка модели WAVEWATCH III для расчетов волнения

Fig. 2. The WAVEWATCH III model unstructured grid for waves simulations

зволяет уменьшить шаг в прибрежных районах, у островов и в проливах и увеличить его в открытых частях водоемов и, соответственно, значительно сократить вычислительные затраты. Существуют два варианта этой модели: трехмерная и двумерная; последняя использовалась в данной работе.

Уравнения гидродинамической модели ADCIRC формулируются с учетом гидростатического приближения и приближения Буссинеска на  $f$ -плоскости. Модель нестационарная, нелинейная. Учитываются такие силы, как сила Кориолиса, касательное ветровое напряжение, градиенты атмосферного давления, приливной потенциал и придонное трение. В модели можно задавать различные свойства подстилающей поверхности, а также осушку и затопление прилегающей суши. При необходимости учета речного стока, его можно задать через соответствующие граничные условия.

Таблица 1

**Статистические характеристики сравнения данных моделирования скорости ветра и высоты волн со спутниковыми данными**

Эксперимент	Систематическая ошибка	Среднеквадратическая ошибка	Коэффициент корреляции
<i>Оценка качества высоты волн, м</i>			
WW3-CFSR	-0,15	0,39	0,86
WW3-CCLM13	-0,20	0,41	0,87
WW3-CCLM3	-0,14	0,40	0,86
<i>Оценка качества скорости ветра, м/с</i>			
CFSR	-0,38	1,92	0,84
CCLM13	-0,42	1,79	0,84
CCLM3	-0,36	2,03	0,79

**Пример результатов верификации экспериментов CCLM13 и CCLM3  
по стационарным данным для 2012 года**

Станции / статистические характеристики	Коэффициент корреляции		Средняя ошибка		Средняя квадратическая ошибка		Стандартное отклонение ошибки	
	CCLM13	CCLM3	CCLM13	CCLM3	CCLM13	CCLM3	CCLM13	CCLM3
Амдерма	0,81	0,75	-0,65	-0,59	1,77	1,93	1,65	1,84
Антипаюта	0,86	0,86	2,05	1,23	2,74	1,89	1,83	1,43
Диксон	0,53	0,88	0,77	0,23	2,23	1,69	2,10	1,68
Баренцбург	0,89	–	0,57	–	1,71	–	1,61	–
Болванский нос	0,81	0,82	-1,29	-0,83	2,21	2,02	1,79	1,85
Голомянный	0,80	0,74	-0,14	-0,26	2,09	2,31	2,08	2,29
им. Федорова	0,83	0,81	0,20	-0,02	1,81	1,98	1,80	1,98
Малые Кармакулы	0,79	0,74	-1,91	-0,64	3,82	3,56	3,31	3,50
им. Кренкеля	0,60	0,57	-0,18	0,18	2,50	2,57	2,50	2,56
Марресале	0,87	0,85	0,36	0,06	1,69	1,70	1,65	1,70
им. Попова	0,83	0,80	0,04	0,14	1,58	1,69	1,59	1,69
Стерлегова	0,79	0,74	0,09	-0,18	1,92	2,13	1,92	2,13
о. Визе	0,73	0,70	0,16	-0,45	2,12	2,29	2,11	2,25
Среднее по станциям	0,78	0,77	0,01	-0,09	2,17	2,15	2,00	2,07

Численная реализация модели ADCIRC по горизонтальным координатам основана на методе конечных элементов (в качестве которых используются треугольники разной площади), по времени используется метод конечных разностей. Первоочередной задачей являлось построение неструктурной триангуляционной расчетной сетки. Проведенные тестовые вычисления расчетной сетки Карского моря показали, что при сложной конфигурации береговой линии моря и наличия огромного количества островов лучшим методом построения расчетной области является так называемый *raving*, т. е. по узлам, расположенным на контуре расчетной области. Применяя этот метод в ПО Surface Modeling System (SMS 11.1), удалось создать расчетную сетку для модели ADCIRC с шагом 500–600 м в прибрежной зоне, 1,5–2 км в центральных районах губ и 10–15 км в открытой части Карского моря (рис. 3). В итоге получилось 66 290 узлов сетки. Глубины моря в узлах расчетной области вычислялись по данным оцифровки навигационных карт масштабов 1:500 000–1:100 000, приобретенных у компании ООО «НавиСофт». Общее количество оцифрованных глубин – 466 993.

Акватория имеет сложную конфигурацию береговой линии и множество островов, в связи с этим модельная область имеет несколько открытых границ. Формирование нагонов в Карском море происходит на фоне приливных колебаний уровня [Добровольский, Залогин, 1982]. Приливные

составляющие (амплитуда и фаза основных полусуточных приливных гармоник M2, S2, N2, K2 и основных суточных гармоник K1, O1, P1, Q1) задавались на северной, открытой границе расчетной области в соответствии с базой данных приливов

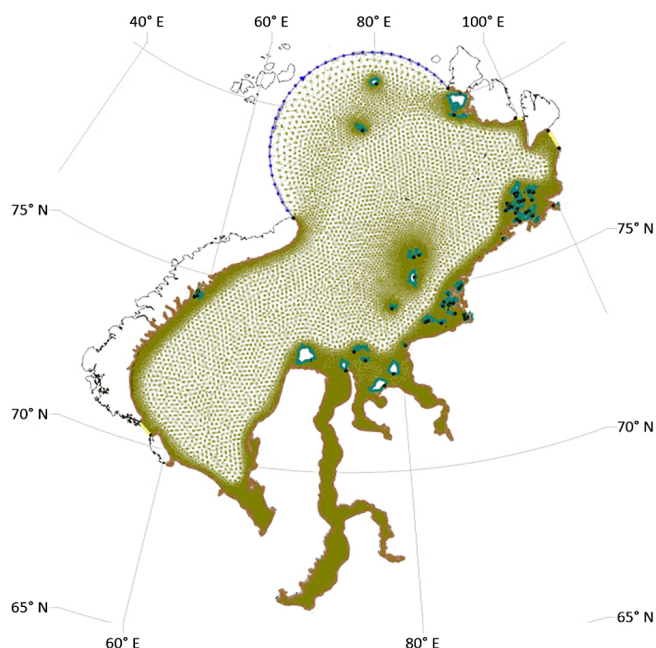


Рис. 3. Неструктурная расчетная сетка Карского моря модели ADCIRC для расчетов нагонов

Fig. 3. The ADCIRC unstructured grid for Kara Sea storm surges simulations

FES2004 [Global Tide..., 2021]. При этом использовалась новая оригинальная батиметрия высокого разрешения и был учтен лед в полярных регионах. В проливах Карские ворота, Вилькицкого, Шокальского и Маточкин шар задавалось граничное условие свободного прохождения волн (wave radiation). На берегу принимались условия нулевого нормального потока к берегу и тангенциальное скольжение. Придонное трение в модели ADCIRC рассчитывалось согласно формулировке квадратичного закона трения. При расчетах коэффициент придонного трения принимался равным 0,0025. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости также задавался постоянным и равным  $2 \text{ м}^2/\text{с}$ . При расчетах использовался соответствующий алгоритм осушки моря и затопления прилегающей территории, речной сток не задавался.

Многолетние расчеты колебаний уровня в Карском море на основе модели ADCIRC проводились с использованием полей ветра и атмосферного давления из реанализов NCEP/CFR/CFRv2 за 1979–2018 гг. Такая реализация позволяет анализировать среднесезонные показатели и межгодовую изменчивость колебаний уровня. Ранее подобный подход был успешно применен для других акваторий, а проведенные оценки качества показали хорошее совпадение результатов моделирования с данными измерений [Иванова и др., 2015; Кораблина и др., 2017; Pavlova et al., 2020]. Поля концентрации льда получены из базы данных OSI SAF (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facilities) [OSI SAF, 2021]. Также для нескольких численных экспериментов использовались поля ветра и давления высокого разрешения по данным CCLM3 для периодов август–октябрь 2012 г. и июль–сентябрь 2014 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Моделирование поля ветра и волнения.** Анализ результатов моделирования полей ветра COSMO-CLM показал, что во всех экспериментах мезомасштабные особенности отчетливо проявлялись именно на шаге сетки  $\sim 3 \text{ км}$  (CCLM3), а на шаге  $\sim 13 \text{ км}$  (CCLM13) они либо не отмечались вовсе, либо проявлялись нечетко и были локализованы в других районах по сравнению с CCLM3. Детальный анализ воспроизведения мезомасштабных циркуляций приведен в [Platonov, Kislov, 2020]. Важным результатом явилось моделирование мезомасштабных мысовых струй, чередующихся в потоке, т. е. протяженных полос циклонической и антициклонической завихренности (вихревых цепочек), ветровой тени (как следствие различий в шероховатости поверхности), которая простирается далее по потоку на расстояние, превосходящее размеры островов.

При обтекании горного хребта у его подветренного склона воспроизведено увеличение скорости ветра и ее стандартного отклонения, т. е. усиление турбулентности, отражающее главные черты характера протекания подветренных бурь (явление новоземельской боры). В частности, на станциях архипелага Новая Земля (Малые Кармакулы, а также станции Роснефти м. Гессена, м. Опасный, Ледовая Гавань, расположенные на восточном побережье Северного острова), наиболее подверженных воздействию кататических ветров в исследуемые периоды, среднеквадратические ошибки скорости ветра уменьшились с  $3,5\text{--}4 \text{ м/с}$  до  $2,7\text{--}3 \text{ м/с}$  при переходе от шага сетки  $12 \text{ км}$  к шагу  $3 \text{ км}$  (см. табл. 2). Это говорит о том, что модель с высоким разрешением адекватно «чувствует» детализацию. Можно также рассчитывать на то, что мезомасштабные циркуляции, в том числе с экстремальными скоростями ветра, будут воспроизводиться достаточно надежно. Это важно в том числе для моделирования волнения или штормовых нагонов в прибрежных районах со сложной орографией и береговой линией, особенно в условиях разреженной сети наблюдений в Арктике.

Скорость ветра при использовании высокоразрешающего моделирования и более грубого реанализа существенно отличается. На рисунках 4 и 5 показаны поля ветра и ветровых волн, рассчитанных на основе форсинга разного разрешения. При воспроизведении поля ветра в эксперименте CCLM3 в открытом море различия с реанализом малы, однако в прибрежной зоне в шхерах они существенные. Модель COSMO-CLM воспроизводит локальные особенности поля ветра, связанные с изменениями подстилающей поверхности (суша, море), обтеканием возвышенностей, конфигурацией береговой линии и др. Для высоты волн при направлении ветра с моря на берег различия при использовании разного форсинга минимальны, а при ветре с берега локальные особенности его поля имеют большее влияние (см. рис. 5).

Подробный анализ полей ветра и волнения выполнен для участка восточного побережья Новой Земли, где присутствуют характерные особенности – узкие шхеры шириной от  $2\text{--}3$  до  $13 \text{ км}$ . Вывод данных производился в точках, расположенных на входе в шхеры (рис. 6). Рассмотрим изменение скорости ветра и высоты волн в точке в шхере № 5. Экстремальные скорости ветра по данным эксперимента CCLM3, как правило, выше, чем по реанализу NCEP/CFR (рис. 7). В целом корреляция двух рядов по скорости ветра высокая, однако, по абсолютным значениям различия велики. Для высоты волн различия двух реализаций, использующих форсинг CCLM3 и NCEP/CFR



(WW3-CCLM3 и WW3-CFSR), намного меньше. Это связано с тем, что поле волн формируется в открытой части Карского моря, где различия в форсинге невелики, и далее волна приходит в прибрежную зону. Максимальные различия не превышают 0,5 м.

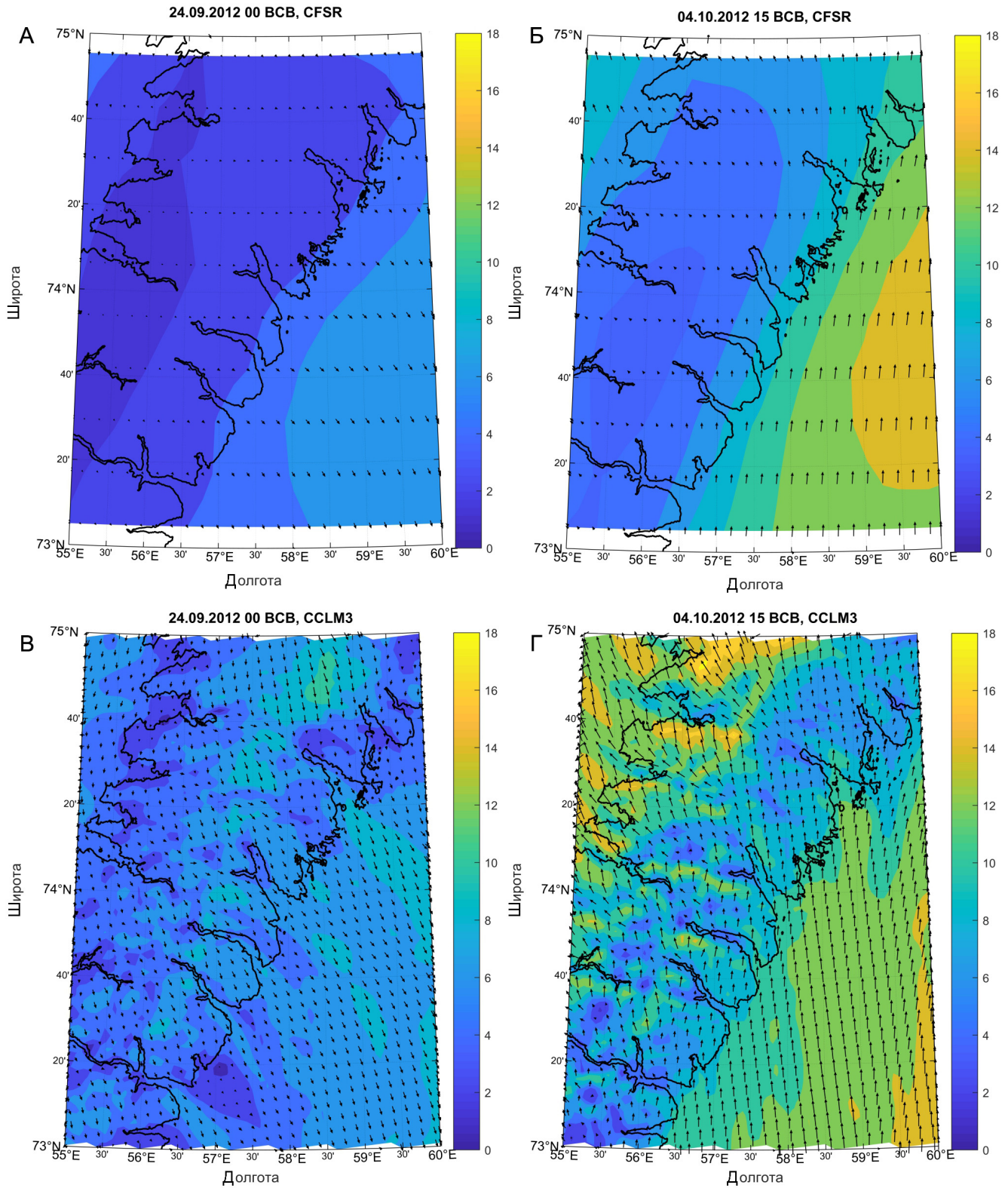


Рис. 4. Поле скорости (м/с) и направления (стрелочки) ветра по данным реанализа NCEP/CFSR (А, Б) и эксперимента CCLM3 (В, Г) 24.09.2012 в 00 ч ВСВ (А, В) и 04.10.2012 в 15 ч ВСВ (Б, Г)

Fig. 4. Wind speed (m/s) and direction (arrows) according to the NCEP/CFSR reanalysis (А, Б) and the CCLM3 experiment (В, Г) 24.09.2012 00 UTC (А, В) and 04.10.2012 15 UTC (Б, Г)

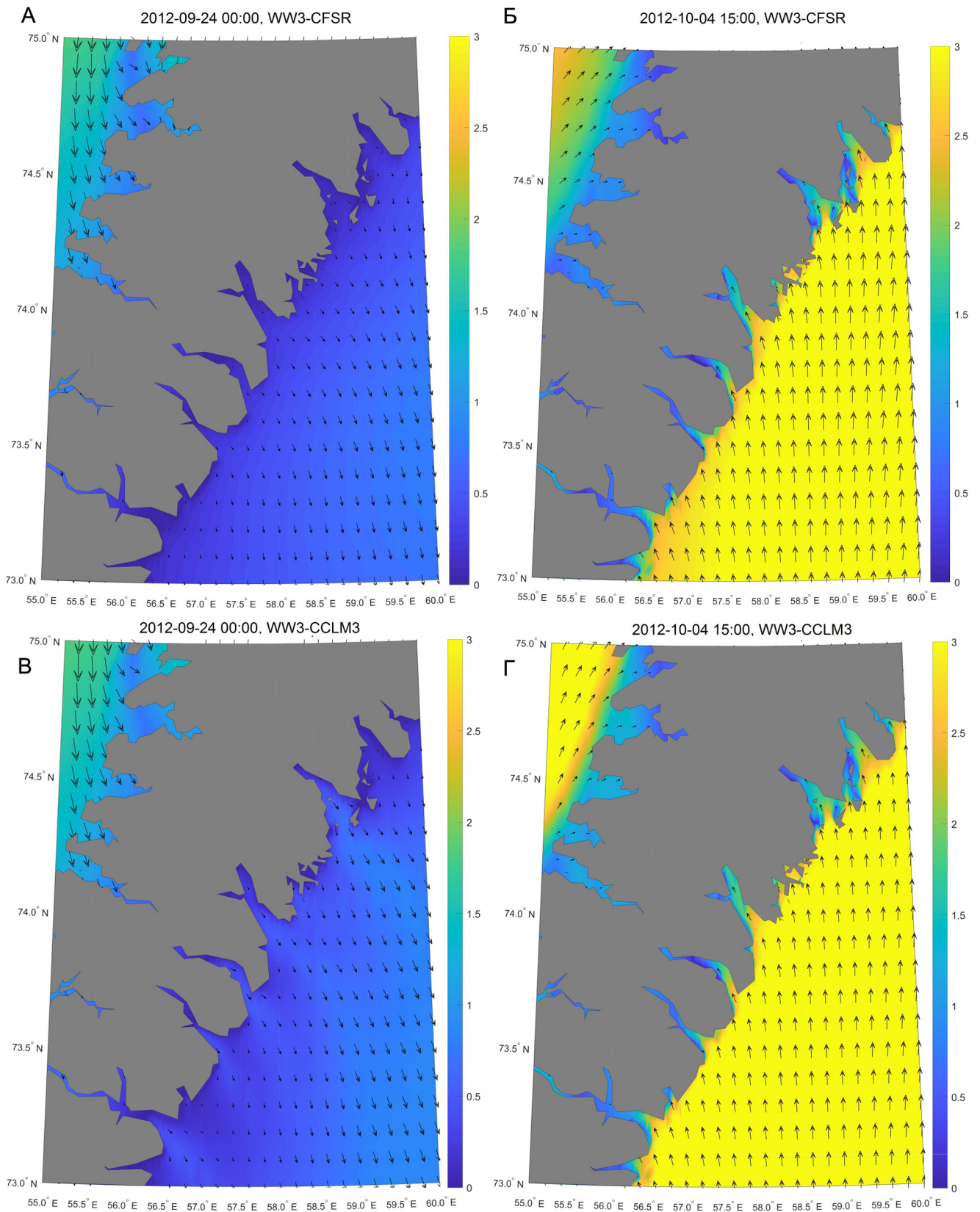


Рис. 5. Поле высоты волн (м) и их направления (стрелочки) по данным экспериментов WW3-CFSR (А, Б) и WW3-CCLM3 (В, Г) 24.09.2012 в 00 ч ВСУ (А, В) и 04.10.2012 в 15 ч ВСУ (Б, Г)

Fig. 5. Wave height (m) and their direction (arrows) according to WW3-CFSR (А, Б) and WW3-CCLM3 (В, Г) experiments 24.09.2012 00 UTC (А, В) and 04.10.2012 15 UTC (Б, Г)



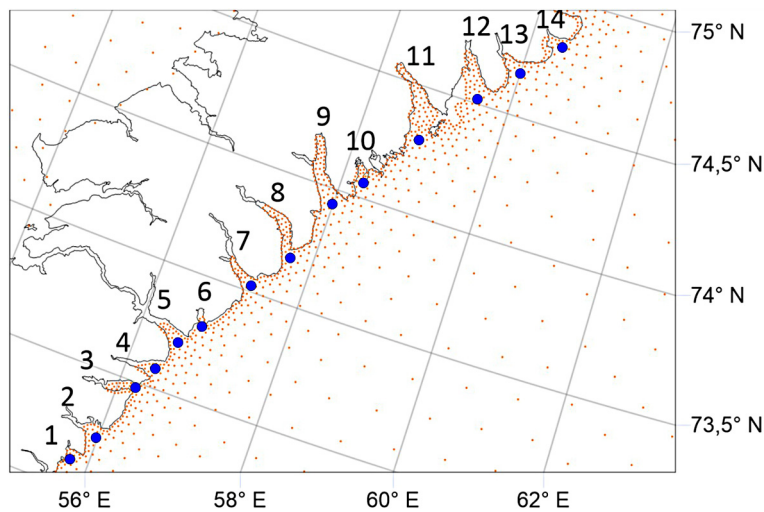


Рис. 6. Карта района исследования (о. Новая Земля) с точками неструктурной сетки модели WAVEWATCH III.

Цифрами обозначены номера шхер, анализируемых далее в тексте

Fig. 6. Map of the region of study (Novaya Zemlya Island) with unstructured grid points of the WAVEWATCH III model. Digits denoted skerries numbers analyzed in the following text

Далее было выполнено сопоставление высоты волн в реализациях WW3-CCLM3, WW3-CFSR и скорости ветра в эксперименте CCLM3 и реанализе NCEP/CFSR отдельно для каждой шхеры, которые были ранжированы по ширине. Среднеквадратическое отклонение (СКО) для скорости ветра (высоты волн) в реализации CCLM3 (WW3-CCLM3) значительно (незначительно) превышает СКО в CFSR (WW3-CFSR) (рис. 8), при этом связи величины СКО с размером шхер не наблюдается.

Если рассмотреть средние разности CFSR–CCLM3 по скорости ветра (рис. 9А), то можно отметить их уменьшение с увеличением ширины шхеры. Например, при ширине шхер 6 км скорость ветра по реанализу CFSR в среднем выше, чем в эксперименте CCLM3, на 0,4 м/с (см. рис. 9А). При увеличении ширины шхеры до 19 км разности существенно уменьшаются, что связано с сопоставимостью пространственного разрешения реанализа, которое и составляет около 20 км. Для разностей в высоте волн между экспериментами WW3-CCLM3 и WW3-CFSR подобная тенденция не наблюдается (см. рис. 9В), так как в основном волна приходит из открытого моря, где различия между экспериментами невелики. Однако, если рассматривать отдельно только случаи ветра с берега, то разности в высоте волн существенно увеличиваются. Впрочем, подобные ситуации наблюдаются редко, а разности в направлении ветра всегда отрицательные.

В результате можно сделать вывод, что воспроизведение скорости ветра в шхерах небольшого размера в прибрежной зоне для эксперимента CCLM3

существенно отличается от реанализа CFSR. Для высоты волн различия при использовании разного форсинга минимальны при ветре с моря, и увеличиваются при ветре с берега.

**Моделирование нагонов.** Рассмотрим результаты моделирования уровня моря и течений за период с 1979 по 2018 г. с использованием форсинга из реанализа NCEP/CFSR/CFSRv2. Приливы в Карском море почти правильные полусуточные. Это показывает проведенный спектральный анализ временных рядов уровня моря по данным моделирования. Самая большая величина прилива (разность уровней смежных полной и малой вод) за весь период моделирования наблюдается в вершине Байдарацкой губы. Здесь она достигает 2 м. В других районах значительно меньше – в пределах от 0,2 до 0,7 м. Наибольшие величины нагонов отмечаются в южной части Обской губы – до 2,5 м. В других полузамкнутых водоемах (Тазовская, Гыданская и Байдарацкая губы, Енисейский и Пясинский заливы) величина нагона достигает 1,5 м. Вне пределов бухт, губ и заливов максимальная высота нагона – около 1 м (рис. 10).

На рисунке 11 приведено количество случаев нагонов высотой большей 0,5 м по годам в южных частях Байдарацкой и Обской губ. Как видно, формирование нагонов такой высоты в Обской губе происходит значительно чаще (примерно в два раза), чем в Байдарацкой. Кроме этого, многолетние тренды изменения количества нагонов находятся в противофазе. В период с 1995 по 2005 г. в Байдарацкой губе наблюдалось наименьшее количество нагонов, в то время как в Обской, наоборот, наибольшее. По результатам моделирования обнаружена высокая корреляция между скоростью и направлением ветра и появлением нагонов в Байдарацкой и Обской губах, а связь нагонов с атмосферным давлением отсутствует. Следовательно, наличие противофазы в трендах количества нагонов можно объяснить климатическими изменениям в повторяемости направлений ветра северо-западных и северо-восточных румбов.

Следует также отметить, что дальше на восток от Обской губы количество нагонов высотой большей 0,5 м резко уменьшается. Так, в Пясинском заливе они возникают 1–5 раз в год, а в отдельные годы нагонов такой величины вообще нет.

Благодаря вычислительной сетке с высоким разрешением, описывающей особенности береговой линии и острова, моделирование течений и уровня моря позволяет выявлять важные локальные осо-



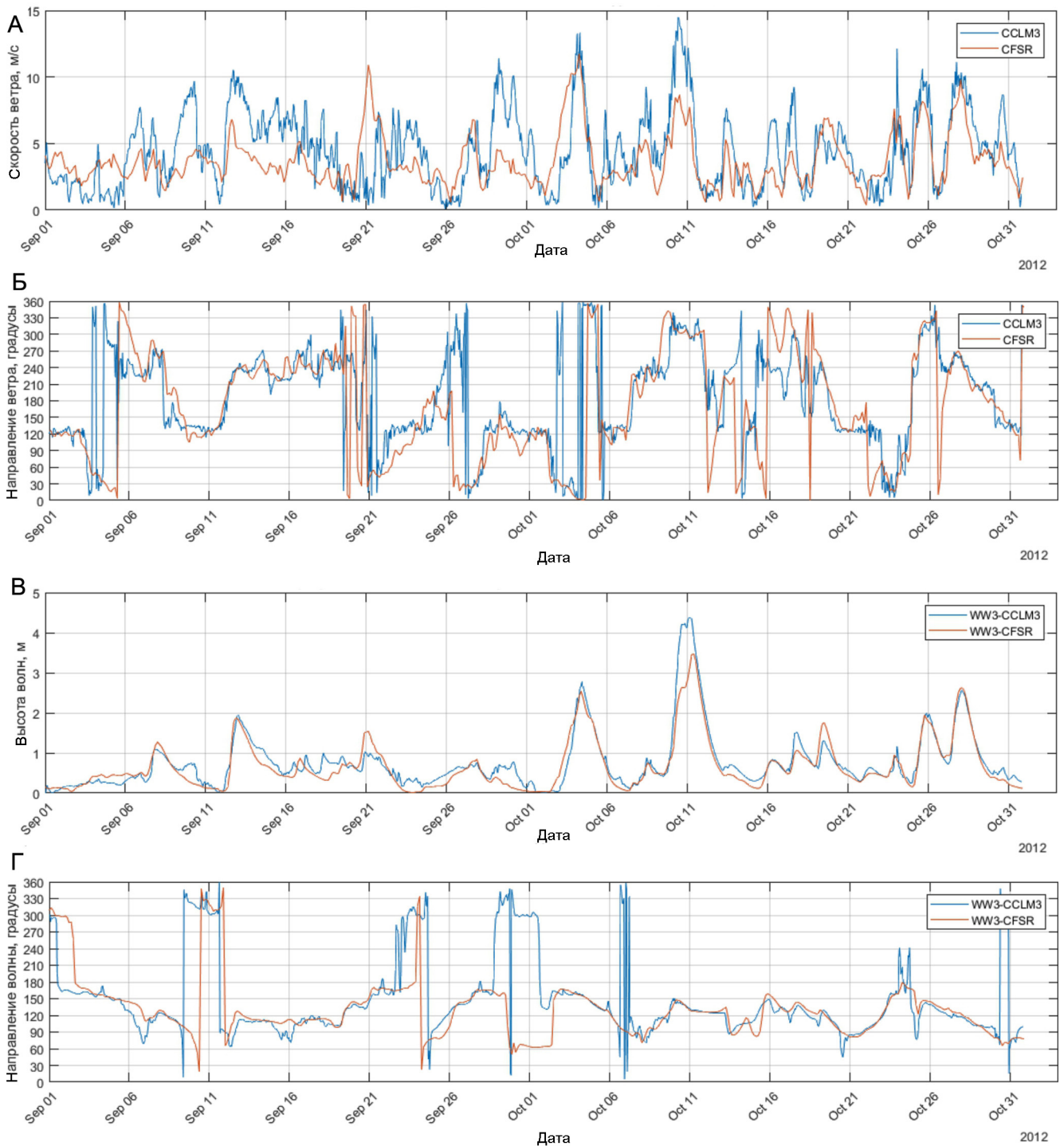


Рис. 7. Временной ход скорости (А) и направления ветра (Б) по результатам эксперимента CCLM3 и реанализа NCEP/CFSR, высоты (В) и направления волн (Г) по результатам экспериментов WW3-CCLM3 и WW3-CFSR в шхере № 5 за период 1.09–31.10.2012

Fig. 7. Time variation of the wind speed (А) and wind direction (Б) according to the results of the CCLM3 experiment and NCEP / CFSR reanalysis, the wave heights (В) and direction (Г) according to the results of the WW3-CCLM3 and WW3-CFSR experiments in skerry No. 5 for 1.09–31.10.2012

бенности. На рисунке 12 приведен уровень моря за 14 декабря 1984 г. в районе Пясинского залива, наблюдается нагон высотой около 2 м, моделируемый с учетом островов и сложной орографии.

Расчет уровня моря и течений с использованием форсинга высокого разрешения CCLM3 для более короткого периода существенно влияет на результат в узких и длинных губах и заливах и в меньшей сте-

пени – в более открытых акваториях (рис. 13). Изменение высоты нагона в реализации с использованием форсинга CCLM3 составляет до  $\pm 0,3 \dots 0,5$  м. Однако, из-за отсутствия данных инструментальных наблюдений мы не можем утверждать, что

какой-то из вариантов ближе к реальности. Но, безусловно, можно констатировать, что статистические результаты повторяемости нагонов за 40 лет существенно изменятся при использовании другого форсинга.

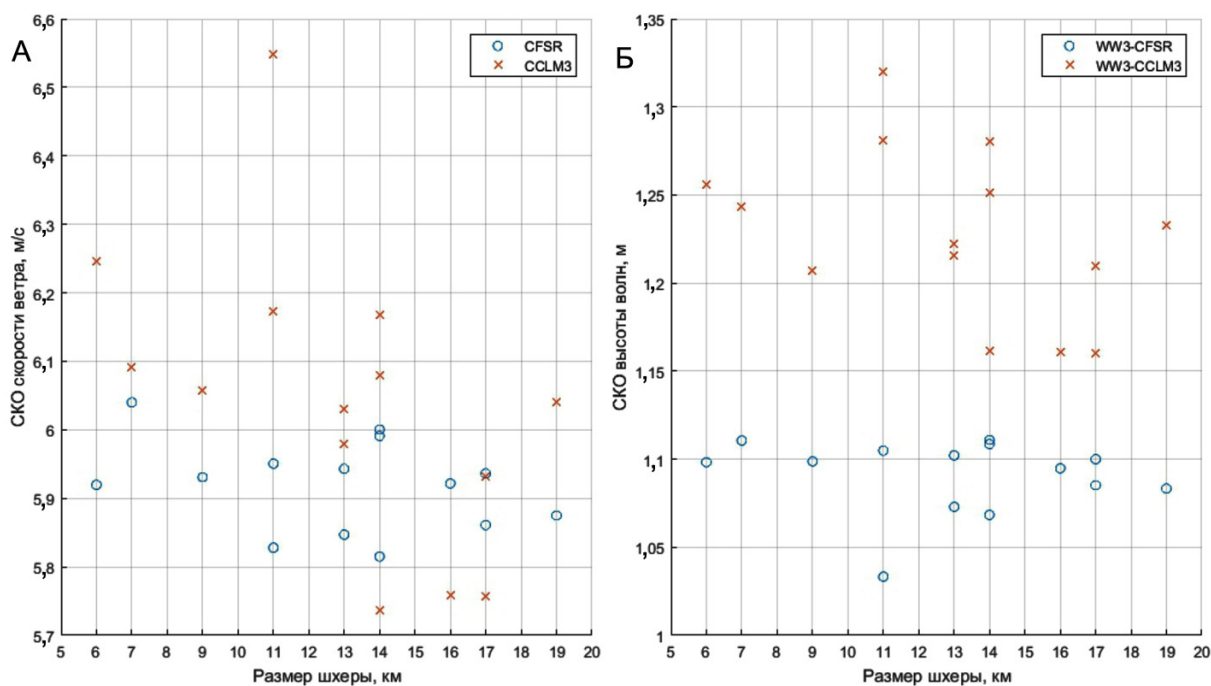


Рис. 8. Диаграммы рассеяния среднеквадратичного отклонения скорости ветра (А) и высоты волн (Б) по данным эксперимента CCLM3 и реанализа NCEP/CFSR для выборки случаев направления ветра с берега в море в зависимости от горизонтального размера шхеры

Fig. 8. Scatter diagrams of the root-mean-square deviation of wind speed (A) and wave height (Б) according to the CCLM3 experiment and NCEP/CFSR reanalysis for a sample of cases of wind direction from the coast to the sea, depending on the horizontal size of the skerry

## ВЫВОДЫ

Высокоразрешающее моделирование в условиях сложной береговой линии и рельефа в регионе Карского моря применено для воспроизведения ветра, волнения и штормовых нагонов. Использование пространственного разрешения порядка 3 км показало, что подобная детализация позволяет воспроизводить многие мезомасштабные циркуляции в прибрежной зоне, в том числе связанные с высокими скоростями ветра и волнением. Показаны преимущества использования моделей высокого разрешения по сравнению с доступными данными глобальных реанализов, в том числе в качестве форсинга волновых моделей. Продемонстрирована более высокая пространственная изменчивость поля ветра по данным COSMO-CLM, которая проявляется в том числе и в более высоких экстремумах скорости ветра и высоты волн в некоторых шхерах в штормовые периоды. Для ветровых волн наблюдаются небольшие различия при различном форсинге в высоте волн при ветре с моря на берег, и большие – при ветре с берега на море. В узких шхерах шириной в не-

сколько километров СКО скорости, направления ветра и высоты волн выше по данным моделирования высокого разрешения, чем по данным реанализа.

Продемонстрированы результаты моделирования уровня моря с высоким разрешением сетки модели и с различным разрешением ветрового форсинга. Самая большая величина прилива наблюдается в вершине Байдарацкой губы и составляет 2 м. Наибольшие величины нагонов отмечаются в южной части Обской губы – до 2,5 м. Вне пределов бухт, губ и заливов максимальная высота нагона – около 1 м. Формирование нагонов в Обской губе происходит примерно в два раза чаще, чем в Байдарацкой. Многолетние тренды изменения количества нагонов находятся в противофазе – в 1995–2005 гг. в Байдарацкой губе наблюдалось наименьшее количество нагонов, а в Обской – наибольшее. Использование форсинга более высокого разрешения приводит к значительным изменениям высоты нагонов в узких и длинных губах и практически не влияет на результат моделирования в более открытых акваториях.

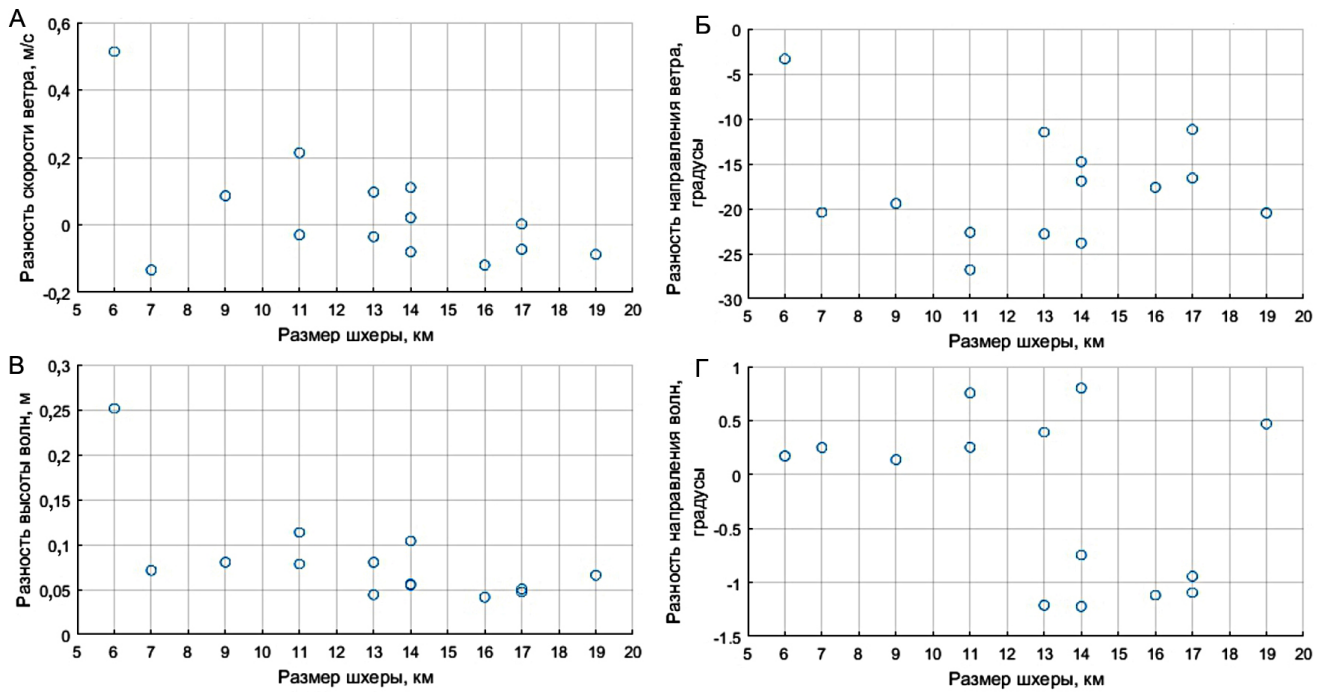


Рис. 9. Диаграммы рассеяния средних значений разностей скорости (А) и направления ветра (Б), высоты (В) и направления волн (Г) между данными эксперимента CCLM3 (WW3-CCLM3) и реанализа NCEP/CFSR для выборки случаев направления ветра с берега в море и высот значительных волн более 1 м в зависимости от горизонтального размера шхеры

Fig. 9. Scatter diagrams of mean values of differences in wind speed (A) and direction (Б), wave height (B) and direction (Г) between the data of the CCLM3 (WW3-CCLM3) experiment and NCEP / CFSR reanalysis for sampling of cases of wind direction from the coast to the sea and the heights of significant waves over 1 m, depending on the horizontal size of the skerry

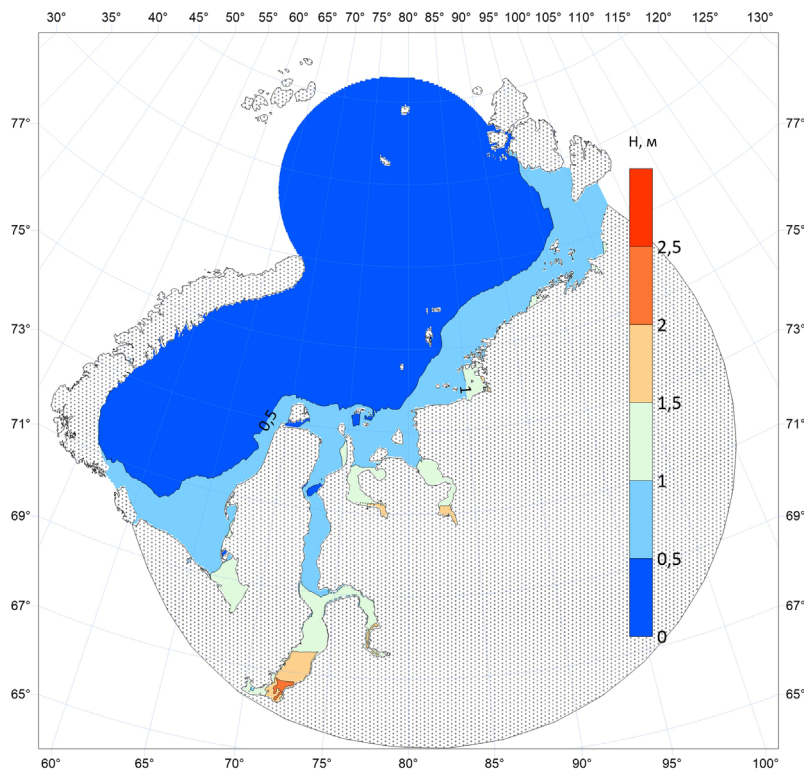


Рис. 10. Максимальная рассчитанная по модели ADCIRC величина нагона в Карском море за 1979–2018 гг.

Fig. 10. The maximum surge value calculated by the ADCIRC model in the Kara Sea for 1979–2018



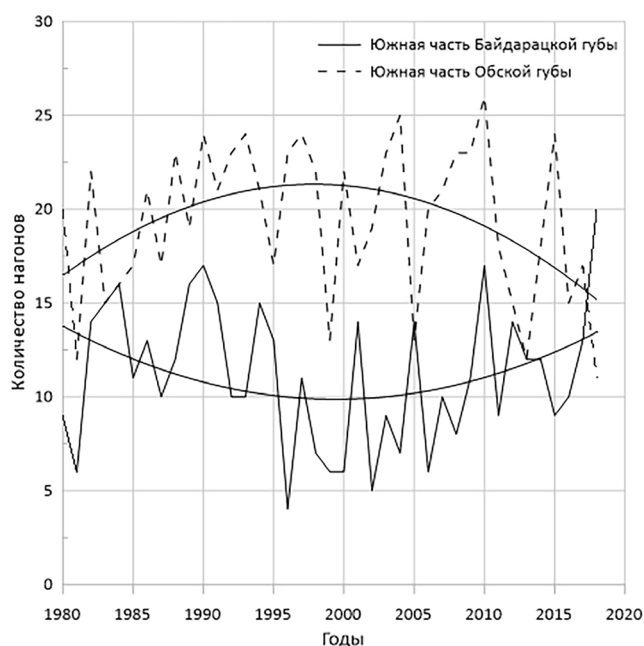


Рис. 11. Количество случаев нагонов высотой более 0,5 м по годам в губах Карского моря

Fig. 11. The number of cases of surges with a height of more than 0,5 m over the years in the Kara Sea bays

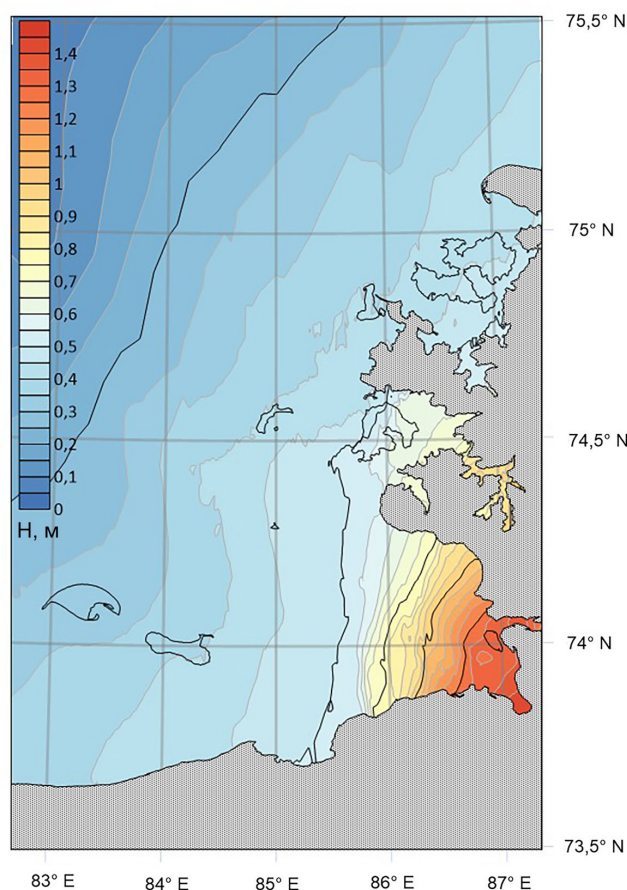


Рис. 12. Уровень моря по данным моделирования за 14 декабря 1984 г.

Fig. 12. Sea level according to modelling results for December 14, 1984

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60147. Работа В.С. Платонова осуществлялась в рамках госбюджетной темы № 121051400081-7. При подготовке данной работы финансирование для А.В. Кислова осуществлено в рамках магистерской программы МГУ имени М.В. Ломоносова «Природная и социальная среда Арктики». Работа С.А. Мысленкова выполнялась при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения природной среды». Работа Архипкина В.С. осуществлялась в рамках госбюджетной темы № 121031900090-6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аишк И.М., Прошутинский А.Ю., Степанов В.А. Некоторые результаты и перспективы численных прогнозов стогно-нагонных колебаний уровня арктических морей // *Метеорология и гидрология*. 1989. № 8. С. 74–82.
- Аишк И.М. Численные расчеты и прогнозы колебаний уровня моря и сплоченности льдов в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском // *Научные результаты экспедиции ЛАПЭКС-93*. СПб.: Гидрометеоздат, 1994. С. 199–209.
- Аишк И.М. Численные расчеты и прогнозы колебаний уровня, течений и дрейфа льда на шельфе морей Западного сектора Арктики // *Навигация и гидрография*. 1997. № 4. С. 85–94.
- Борисов Е.В., Раевский Д.Н. Сравнение и использование наблюдений и моделирования уровня в Карском море // *Арктика: Экология и экономика*. 2016. № 4. Т. 24. С. 72–79.
- Дианский Н.А., Фомин В.В., Кабатченко И.М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // *Арктика: экология и экономика*. 2014. № 1. Т. 13. С. 57–73.
- 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.
- Дианский Н.А., Панасенкова И.И., Фомин В.В., Гусев А.В., Кабатченко И.М. Система оперативных и ретроспективных расчетов гидрометеорологических параметров и морского льда для западных морей российской Арктики // *Морские информационно-управляющие системы*. 2020. Т. 17. № 1. С. 44–51.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С. *Моря СССР*. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.

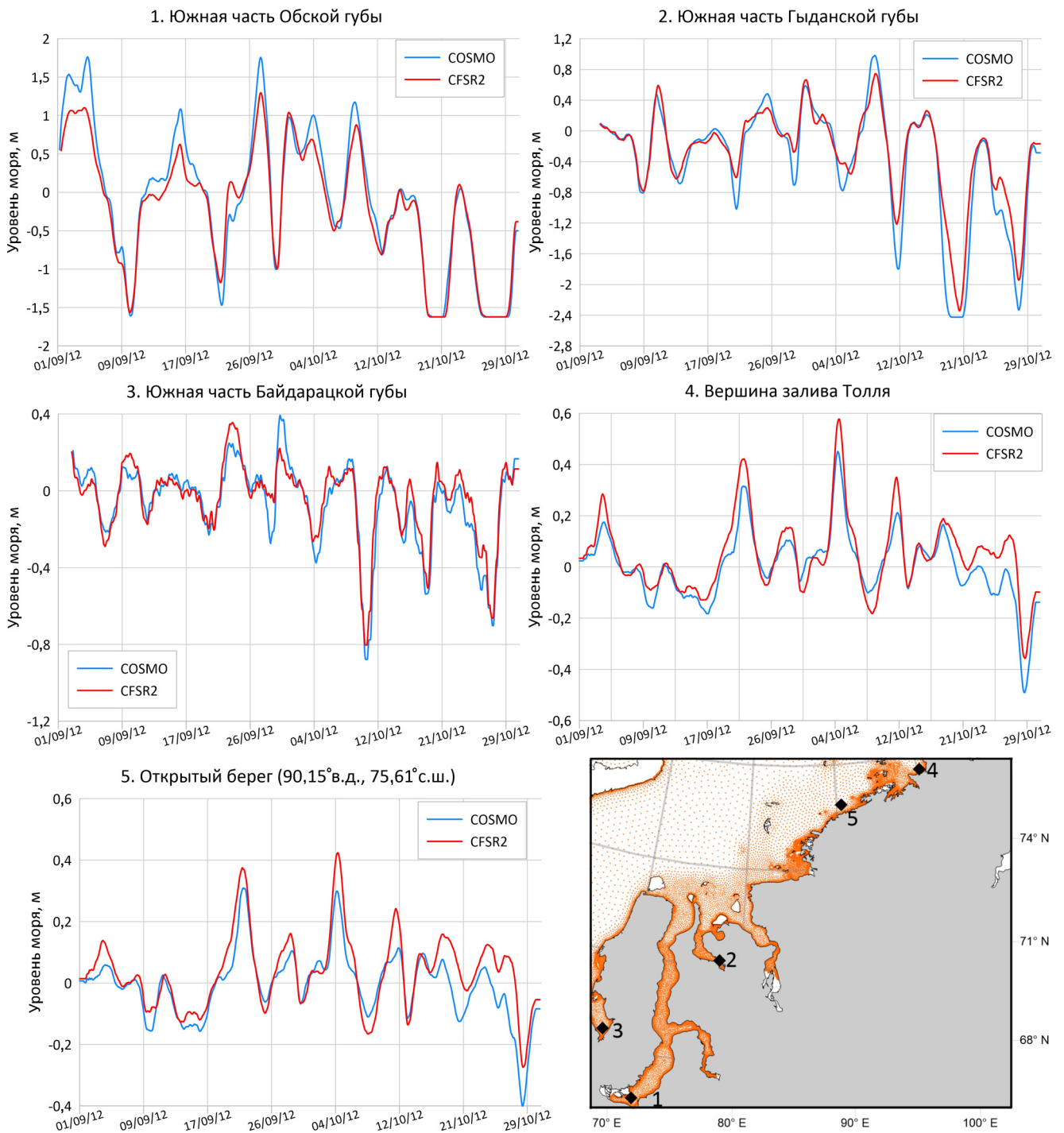


Рис. 13. Колебания уровня моря в различных точках Карского моря по данным моделирования при использовании форсинга CCLM3 и CFSR

Fig. 13. Sea level fluctuations at different points in the Kara Sea according to modeling data using forcing CCLM3 and CFSR

Иванова А.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 3. С. 41–49.

Кислов А.В., Ривин Г.С., Платонов В.С., Варенцов М.И., Розинкина И.А., Никитин М.А., Чумаков М.М. Мезомасштабное моделирование экстремальных ветров над Охотским морем и островом Сахалин // Известия

РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 4. № 54. С. 381–385. DOI: 10.1134/S0002351518040090.

Кораблина А.Д., Кондрин А.Т., Архипкин В.С. Моделирование нагонов в Белом и Баренцевом морях за период 1979–2015 гг. // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 364. С. 144–158.

- Мысленков С.А., Маркина М.Ю. Особенности распространения потока волновой энергии в Карском море // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3. Т. 369. С. 119–131.
- Мысленков С.А., Столярова Е.В., Маркина М.Ю., Киселева С.В., Архипкин В.С., Горлов А.А., Умнов П.М. Сезонная и межгодовая изменчивость потока волновой энергии в Баренцевом море // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 19–21. Т. 231–233. С. 36–48. DOI: 10.15518/isjaee.2017.19-21.036-048.
- Arakawa A., Lamb V.R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model, *Meth. in Comp. Phys.*, 1977, no. 17, p. 173–265.
- Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming, *J. of Clim.*, 2010, vol. 23, no. 14, p. 3888–3906, DOI: 10.1175/2010JCLI3297.1.
- Blain C.A., Preller R.H., Rivera A.P. Tidal Prediction Using the Advanced Circulation Model (ADCIRC) and a Relocatable PC-based System, *Oceanography*, 2002, vol. 15, no. 1, p. 77–87.
- Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM – The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications, *COSMO Newsletters*, 2006, vol. 6, p. 225–235.
- Bromwich D., Wilson A.B., Bai L., Liu Z., Barlage M., Shih C.-F., Maldonado S., Hines K.M., Wang S.-H., Woollen J., Kuo B., Lin H.-C., Wee T.-K., Serreze M. C., Walsh J.E. The Arctic System Reanalysis, version 2, *Bull. of Amer. Met. Soc.*, 2018, vol. 99, p. 805–828, DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0215.1.
- Cohen J., Pfeiffer K., Francis J.A. Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States, *Nat. Comm.*, 2018, vol. 9, no. 1, p. 1–12, DOI: 10.1038/s41467-018-02992-9.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., Rosnay de P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. of the R. Met. Soc.*, 2011, vol. 137, no. 656, p. 553–597, DOI: 10.1002/qj.828.
- Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea Region, *Stud. Mar. Sci.*, 2019, vol. 30, p. 100719, DOI: 10.1016/j.rsma.2019.100719.
- Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geoph. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, no. 6, L06801, DOI: 10.1029/2012GL051000.
- Gal-Chen T., Somerville R.C.J. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations, *J. of Comp. Phys.*, 1975, vol. 17, no. 2, p. 209–228, DOI: 10.1016/0021-9991(75)90037-6.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara de G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu Cr., Radnoti G., Rosnay de P., Rozum I., Vamborg Fr., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, iss. 730, p.1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Johannessen O.M., Kuzmina S., Bobylev L.P., Miles M.W. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalization, *Tellus*, 2016, vol. 68A, 28234, DOI: 10.3402/tellusa.v68.28234.
- Li J., Ma Y., Liu Q., Zhang W., Guan C. Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019, vol. 164, p. 102790, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102790.
- Moore G.W.K., Renfrew I.A. Tip jets and barrier winds: A QuikSCAT climatology of high wind speed events around Greenland, *J. of Clim.*, 2005, vol. 18, no. 18, p. 3713–3725, DOI: 10.1175/JCLI3455.1.
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, vol. 13, no. 648, DOI: 10.3390/w13050648.
- Utten S.D., Esau I. A link between Arctic Sea ice and recent cooling trends over Eurasia, *Clim. Changes*, 2012, vol. 110, no. 3–4, p. 1069–1075, DOI: 10.1007/s10584-011-0334-z.
- Pavlova A.V., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. Storm surge modelling in the Caspian Sea using an unstructured grid, *Russian J. of Earth Sciences*, 2020, vol. 20, no. 1, p. ES1006, DOI: 10.2205/2019ES000688.
- Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara Sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. of Geoph. Res. Atm.*, 2010, vol. 115, no. D21, DOI: 10.1029/2009JD013568.
- Platonov V.S., Varentsov M.I. Supercomputer technologies as a tool for high-resolution atmospheric modelling towards the climatological timescales, *Supercomp. Front. And Innov.*, 2018, vol. 5, no. 3, p. 107–110, DOI: 10.14529/jsfi180320.
- 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, no. 3, p. 350, DOI: 10.3390/atmos12030350.
- 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, no. 10, p. 1062, DOI: 10.3390/atmos11101062.
- Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean, *Science*, 2017, vol. 356, p. 285–291, DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Rockel B., Geyer B. The performance of the regional climate model CLM in different climate regions, based on the example of precipitation, *Met. Zeitsch.*, 2008, vol. 17, no. 4, p. 487–498.
- Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T.,



- Chuang H.-Y., Juang H.-M., Sela J., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2010, vol. 91, p. 1015–1057, DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
- Serreze M., Stroeve J. Arctic Sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 2015, vol. 373, 20140159, DOI: 10.1098/rsta.2014.0159.
- Schär C., Leuenberger D., Fuhrer O., Lüthi D., Girard C. A new terrain-following vertical coordinate formulation for atmospheric prediction models, *Mon. Wea. Rev.*, 2002, vol. 130, no. 10, p. 2459–2480, DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<2459:ANTFVC>2.0.CO;2.
- Schulz J.-P., Heise E. A new scheme for diagnosing near-surface convective gusts, *COSMO Newsletter*, 2003, vol. 3, p. 221–225.
- 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, no. 7, p. 726, DOI: 10.3390/atmos11070726.
- Stopa J., Ardhuin F., Girard-Ardhuin F. Wave climate in the Arctic 1992–2014: Seasonality and trends, *Cryosphere*, 2016, vol. 10, p. 1605–1629, DOI: 10.5194/tc-10-1605-2016.
- Storch von H., Langenberg H., Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes, *Mon. Wea. Rev.*, 2000, vol. 128, no. 10, p. 3664–3673, DOI: 10.1175/1520-0493(2000)128<3664:ASNTFD>2.0.CO;2.
- Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review, *Surv. in Geoph.*, 2014, vol. 35, no. 5, p. 1175–1214, DOI: 10.1007/s10712-014-9284-0.
- Voevodin V., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community, *Supercomp. Front. and Innov.*, 2019, vol. 6, no. 2, p. 4–11, DOI: 10.14529/jsfi190201.
- Yang X.Y., Yuan X., Ting M. Dynamical link between the Barents-Kara sea ice and the Arctic Oscillation, *J. of Clim.*, 2016, vol. 29, no. 14, p. 5103–5122, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0669.1.
- Young I.R., Ribal A. Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height, *Science*, 2019, vol. 364, no. 6440, p. 548–552, DOI: 10.1126/science.aav9527.
- Электронные ресурсы*  
 Атлас «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана». Карское море / ЕСИМО. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2007. URL: <http://www.esimo.ru/atlas/Karsk/2waterlevel.html> (дата обращения 17.05.2021).
- Coastal Emergency Risks. Assessment CERA, 2021. URL: <https://cera.coastalrisk.live> (дата обращения 07.08.2021).
- Core documentation of the COSMO-model. Consortium for Small Scale Modelling, 2003. URL: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm> (дата обращения 17.05.2021).
- Global Tide – FES2004. AVISO<sup>+</sup>. Satellite Altimetry Data. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2004.html> (дата обращения 17.05.2021).
- OSI SAF (Ocean and Sea Ice). EUMETSAT. URL: <http://www.osi-saf.org/?q=content/global-sea-ice-concentration-climate-data-record-smmrsmssmis> (дата обращения 17.05.2021).
- The Climate Limited-area Modelling Community, 2005. URL: <https://wiki.coast.hzg.de/clmcom> (дата обращения 17.05.2021).
- Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG): User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 465 pp. +Appendices. (PDF) User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 6.07. 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) (дата обращения 17.05.2021).

Поступила в редакцию 15.03.2021  
 После доработки 04.06.2021  
 Принята к публикации 20.07.2021

## HIGH-RESOLUTION MODELLING OF THE HYDROMETEOROLOGICAL FIELDS OVER THE KARA SEA COASTAL REGIONS IN COMPLEX COASTLINE CONDITIONS

V.S. Platonov<sup>1</sup>, S.A. Myslenkov<sup>2</sup>, V.S. Arkhipkin<sup>3</sup>, A.V. Kislov<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

<sup>1</sup> *Department of meteorology and climatology, Ph.D., Research Fellow; e-mail: vplatonov86@gmail.com*

<sup>2</sup> *Department of oceanology, Ph.D., Research Fellow; e-mail: stasocean@gmail.com*

<sup>3</sup> *Department of oceanology, Ph.D., Associate Professor; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com*

<sup>4</sup> *Department of meteorology and climatology, Professor; e-mail: avkislov@mail.ru*

Arctic coastal zones are characterized by diverse severe hydrometeorological phenomena including high wind speeds, stormy waves and surges. Abundance of islands and mountain ranges, and rugged coastline in the Kara Sea contribute to the formation of mesoscale atmospheric circulations that largely determine the pattern

of coastal currents. The Arctic observational network is not dense enough to reproduce and investigate hydro-meteorological characteristics; therefore the paper is based on high-resolution modeling of wind, waves, sea level and currents. Experiments were conducted with COSMO-CLM non-hydrostatic mesoscale atmospheric model for the Kara Sea region with ~12 and ~3 km resolutions. In contrast with global NCEP/CFSR reanalysis the model with 3 km resolution could reproduce such phenomena as tip jets, downslope windstorms and cyclonic chains in the skerries of different scales. This is an important reason for utilizing the COSMO-CLM wind speed fields as forcing data for modeling waves and surges. The WAVEWATCH III model was applied for wave simulation; and the ADCIRC model was used for sea level and currents simulation. During on-shore wind conditions there are almost no differences between wave simulations using high-resolution wind speed and NCEP/CFSR reanalysis. However, the impact of local wind field is significant when off-shore wind is observed. Sea level modeling within narrow bays and creeks using high-resolution wind speed fields has shown significant differences from the experiments based on the NCEP/CFSR reanalysis. Maximal calculated Kara Sea surges are up to 2,5 m and are noticed at the southern part of the Gulf of Ob. Surges in the Gulf of Ob are formed two times more often than in the Baydaratskaya Bay. Long-term trends in the number of surges are opposite, i.e. minimal number of surges was in the Baydaratskaya Bay during the 1995–2005, while maximal number of surges was in the Gulf of Ob during the same period. Keywords: high-resolution hydrodynamic modelling, wind waves, wind surges, COSMO-CLM, WAVEWATCH III, ADCIRC, Kara Sea.

**Keywords:** high-resolution hydrodynamic modeling, wind waves, wind surges, COSMO-CLM, WAVEWATCH III, ADCIRC, the Kara Sea

**Acknowledgements.** The reported study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60147). Work of V. Platonov was carried out under the State budget theme no. 121051400081-7. Work of A.V. Kislov was funded through the Lomonosov MSU Master Program “Arctic natural and social environment”. Work of S.A. Myslenkov was funded under the Interdisciplinary Lomonosov Moscow State University scientific and educational school “Future Planet and Environmental Global Changes”. The Work of V. Arkhipkin was funded by the Lomonosov Moscow State University project no. 121031900090-6.

## REFERENCES

- Arakawa A., Lamb V.R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model, *Meth. in Comp. Phys.*, 1977, no. 17, p. 173–265.
- Ashik I.M. Chislennye reaschety i prognozy kolebaniy urovnya morya i splochnosti l'dov v moryakh Laptevskikh i Vostochno-Sibirskom. [Numerical calculations and forecasts of the sea level oscillations and ice concentration over the Laptev and the East Siberian seas] In: “*Nauchnye rezultaty 'ekspeditsii LAPEKS-93'*”, Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1994, p. 199–209. (In Russian)
- Ashik I.M. Chislennye reaschety i prognozy kolebaniy urovnya, techeniy i dreifa l'da na shel'fe morey Zapadnogo sektora Arktiki [Numerical calculations and forecasts of the sea level oscillations, currents and ice drift over the shelf of the Western Arctic seas], *Navigatsiya i gidrografiya*, 1997, no. 4, p. 85–94. (In Russian)
- Ashik I.M., Proshutinskiy A.Yu., Stepanov V.A. Nekotorye rezultaty i perspektivy chislennykh prognozov sgonnagonnykh kolebaniy urovnya arkticheskikh morey [Some results and perspectives of the numerical forecasting of surge oscillation of the Arctic seas level], *Meteorologiya i Gidrologiya*, 1989, no. 8, p. 74–82. (In Russian)
- Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming, *J. of Clim.*, 2010, vol. 23, no. 14, p. 3888–3906, DOI: 10.1175/2010JCLI3297.1.
- Blain C.A., Preller R.H., Rivera A.P. Tidal Prediction Using the Advanced Circulation Model (ADCIRC) and a Relocatable PC-based System, *Oceanography*, 2002, vol. 15, no. 1, p. 77–87.
- Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM – The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications, *COSMO Newsletters*, 2006, vol. 6, p. 225–235.
- Borisov E.V., Rayevskiy D.N. Sravnenie i ispol'zovanie nablyudeniy i modelirovaniya urovnya v Karskom more. [Comparison and use of the sea level observations and modelling at the Kara sea], *Arktika: Ekologiya i ekonomika*, 2016, no. 4, vol. 24, p. 72–79. (In Russian)
- Bromwich D., Wilson A.B., Bai L., Liu Z., Barlage M., Shih C.-F., Maldonado S., Hines K.M., Wang S.-H., Woollen J., Kuo B., Lin H.-C., Wee T.-K., Serreze M.-C., Walsh J.E. The Arctic System Reanalysis, Version 2, *Bull. of Amer. Met. Soc.*, 2018, vol. 99, p. 805–828, DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0215.1.
- Cohen J., Pfeiffer K., Francis J.A. Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States, *Nat. Comm.*, 2018, vol. 9, no. 1, p. 1–12, DOI: 10.1038/s41467-018-02992-9.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., Rosnay de P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. of the R. Met. Soc.*, 2011, vol. 137, no. 656, p. 553–597, DOI: 10.1002/qj.828.
- Dianskiy N.A., Fomin V.V., Kabatchenko I.M. Vosproizvedenie tsirkulyatsii Karskogo i Pechorskogo morey s pomoshchyu sistemy operativnogo diagnoza i prognoza

- morskoy dinamiki [Kara and Pechora seas circulation re-production using the operational system of sea dynamics diagnosis and forecast], *Arktika: Ekologiya i ekonomika*, 2014, no. 1, vol. 13, p. 57–73. (In Russian)
- Dianskiy N.A., Panasenkova I.I., Fomin V.V. Issledovanie ot-klika verkhnego sloya Barentseva morya na prokhozhdenie intensivnogo polyarnogo tsyklona v nachale yanvarya 1975 goda [Investigation of the Barents Sea upper layer response on the intense polar low passage at the beginning of January, 1975], *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2019, no. 35, vol. 6, p. 530–548, DOI: 10.22449/0233–7584–2019–6–530–548. (In Russian)
- Dianskiy N.A., Panasenkova I.I., Fomin V.V., Gusev A.V., Kabatchenko I.M. Sistema operativnykh i retrospektivnykh raschetov gidrometeorologicheskikh parametrov i morskogo l'da dlya zapadnykh morei rossiyskoy Arktiki [System of operational and retrospective calculations of hydrometeorological parameters and sea ice for western seas of the Russian Arctic], *Morskie informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2020, no. 17, vol. 1, p. 44–51. (In Russian)
- Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. Morya SSSR. [Seas of the USSR], Moscow, Moscow State University Publ., 1982, 192 p. (In Russian)
- Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea Region, *Stud. Mar. Sci.*, 2019, vol. 30, p. 100719, DOI: 10.1016/j.rsma.2019.100719.
- Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geoph. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, no. 6, L06801, DOI: 10.1029/2012GL051000.
- Gal-Chen T., Somerville R.C.J. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations, *J. of Comp. Phys.*, 1975, vol. 17, no. 2, p. 209–228, DOI: 10.1016/0021-9991(75)90037-6.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara de G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu Cr., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg Fr., Villaume S., Thépaut J-N. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, iss. 730, p.1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Ivanova A.A., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A., Shevchenko G.V. Modelirovanie shtormovykh nagonov v pribrezhnoy zone o. Sakhalin [Storm surges modelling in the Sakhalin Island coastal zone], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 3, p. 41–49. (In Russian)
- Johannessen O.M., Kuzmina S., Bobylev L.P. Miles M.W. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalization, *Tellus*, 2016, vol. 68A, 28234., DOI: 10.3402/tellusa.v68.28234.
- Kislov A.V., Rivin G.S., Platonov V.S., Varentsov M.I., Rozinkina I.A., Nikitin M.A., Chumakov M.M. Mezomasshtabnoe modelirovanie ekstremalnykh vetrov nad Okhotskim morem i ostrovom Sakhalin. [Mesoscale modelling of the extreme wind speeds over the Sea of Okhotsk and Sakhalin Island], *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Fizika Atmosfery i okeana*, 2018, no. 54, vol. 4, p. 381–385, DOI: 10.1134/S0002351518040090. (In Russian)
- Korablina A.D., Kondrin A.T., Arkhipkin V.S. Modelirovanie nagonov v Belom i Barentsevom moryakh za period 1979–2015 gg. [Surges modelling in the White and the Barents seas during 1979–2015 period], *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*, 2017, no. 364, p. 144–158. (In Russian)
- Li J., Ma Y., Liu Q., Zhang W., Guan C. Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019, vol. 164, p. 102790, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102790.
- Moore G.W.K., Renfrew I.A. Tip jets and barrier winds: A QuikSCAT climatology of high wind speed events around Greenland, *J. of Clim.*, 2005, vol. 18, no. 18, p. 3713–3725, DOI: 10.1175/JCLI3455.1.
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, vol. 13, no. 648, DOI: 10.3390/w13050648.
- Myslenkov S.A., Markina M.Yu. Osobennosti rasprostraneniya potoka volnovoi energii v Karskom more [Features of wave energy flux propagation within the Kara Sea], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2018, no. 3, vol. 369, p. 119–131.
- Myslenkov S.A., Stolyarova E.V., Markina M.Yu., Kiseleva S.V., Arkhipkin V.S., Gorlov A.A., Umnov P.M. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' potoka volnovoi energii v Barentsevom more. [Seasonal and interannual variability of the wave energy flux within the Barents Sea], *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2017, no. 19–21, vol. 231–233, p. 36–48, DOI: 10.15518/is-jae.2017.19-21.036-048. (In Russian)
- Outten S.D., Esau I. A link between Arctic sea ice and recent cooling trends over Eurasia, *Clim. Changes*, 2012, vol. 110, no. 3–4, p. 1069–1075, DOI: 10.1007/s10584-011-0334-z.
- Pavlova A.V., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. Storm surge modelling in the Caspian Sea using an unstructured grid, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2020, vol. 20, no. 1, p. ES1006, DOI: 10.2205/2019ES000688.
- Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. of Geoph. Res. Atm.*, 2010, vol. 115, no. D21, DOI: 10.1029/2009JD013568.
- 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, no. 10, p. 1062, DOI: 10.3390/atmos11101062.
- 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, no. 3, p. 350, DOI: 10.3390/atmos12030350.
- Platonov V.S., Varentsov M.I. Supercomputer technologies as a tool for high-resolution atmospheric modeling towards the climatological timescales, *Supercomp. Front. And Innov.*, 2018, vol. 5, no. 3, p. 107–110, DOI: 10.14529/jsfi180320.
- Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of

- the Arctic Ocean, *Science*, 2017, vol. 356, p. 285–291, DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Rockel B., Geyer B. The performance of the regional climate model CLM in different climate regions, based on the example of precipitation, *Met. Zeitsch.*, 2008, vol. 17, no. 4, p. 487–498.
- Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Juang H.-M., Sela J., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2010, vol. 91, p. 1015–1057, DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
- Schär C., Leuenberger D., Fuhrer O., Lüthi D., Girard C. A new terrain-following vertical coordinate formulation for atmospheric prediction models, *Mon. Wea. Rev.*, 2002, vol. 130, no. 10, p. 2459–2480, DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<2459:ANTFVC>2.0.CO;2.
- Schulz J.-P., Heise E. A new scheme for diagnosing near-surface convective gusts, *COSMO Newsletter*, 2003, vol. 3, p. 221–225.
- Serreze M., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 2015, vol. 373, 20140159, DOI: 10.1098/rsta.2014.0159.
- 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, no. 7, p. 726, DOI: 10.3390/atmos11070726.
- Stopa J., Arduin F., Girard-Arduin F. Wave climate in the Arctic 1992–2014: Seasonality and trends, *Cryosphere*, 2016, vol. 10, p. 1605–1629, DOI: 10.5194/tc-10-1605-2016.
- Storch von H., Langenberg H., Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes, *Mon. Wea. Rev.*, 2000, vol. 128, no. 10, p. 3664–3673, DOI: 10.1175/1520-0493(2000)128<3664:ASNTFD>2.0.CO;2.
- Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review, *Surv. in Geoph.*, 2014, vol. 35, no. 5, p. 1175–1214, DOI: 10.1007/s10712-014-9284-0.
- Voevodin V., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumaty S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community, *Supercomp. Front. and Innov.*, 2019, vol. 6, no. 2, p. 4–11, DOI: 10.14529/jsfi190201.
- Yang X.Y., Yuan X., Ting M. Dynamical link between the Barents-Kara sea ice and the Arctic Oscillation, *J. of Clim.*, 2016, vol. 29, no. 14, p. 5103–5122, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0669.1.
- Young I.R., Ribal A. Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height, *Science*, 2019, vol. 364, no. 6440, p. 548–552, DOI: 10.1126/science.aav9527.

#### Web sources

- Atlas “Klimat morei Rossii i klyuchevykh rayonov Mirovogookeana”. ESIMO. Karskoe more [Atlas “Climate of the Russian seas and the World Ocean key regions”. ESIMO. Kara Sea], [http://www.esimo.ru/atlas/Karsk/2\\_waterlevel.html](http://www.esimo.ru/atlas/Karsk/2_waterlevel.html) (accessed on date 17.05.2021). (In Russian)
- The Climate Limited-area Modelling Community, 2005, URL: <https://wiki.coast.hzg.de/clmcom> (access date 17.05.2021).
- Core documentation of the COSMO-model. Consortium for Small Scale Modelling, 2003, URL: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm> (access date 17.05.2021).
- Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG): User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 465 pp. +Appendices. (PDF) User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 6.07. 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) (access date 17.05.2021).
- Coastal Emergency Risks Assessment CERA, 2021, URL: <https://cera.coastalrisk.live> (access date 07.08.2021).
- Global Tide – FES2004. AVISO+. Satellite Altimetry Data, URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2004.html> (access date 17.05.2021).
- OSI SAF (Ocean and Sea Ice). EUMETSAT, URL: <http://www.osi-saf.org/?q=content/global-sea-ice-concentration-climate-data-record-smmrsmismissmis> (access date 17.05.2021).

Received 15.03.2021

Revised 04.06.2021

Accepted 20.07.2021