УДК 551.466.33

**Комплексная система прогнозирования параметров ветрового волнения**

**в Мировом океане и морях России**

А.А. Зеленько[[1]](#footnote-1), С.А. Мысленков1’[[2]](#footnote-2), Ю.Д. Реснянский1, Б.С. Струков1, М.Ю. Зайченко1

*Приводится описание системы прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане, которая представляет собой существенное развитие действующей в Гидрометцентре России с 2014 года оперативной прогностической технологии. Система построена по сопряженной схеме “океан – море – прибрежная зона” для составления прогнозов по всей акватории Мирового океана и отдельным акваториям всех российских морей. Разработанные модельные конфигурации позволяют рассчитывать параметры волнения с горизонтальным разрешением 10-20 км в океанах и 1-5 км в морях России. Для детализации прогнозов в прибрежной зоне морей применяются неструктурные триангуляционные сетки с горизонтальным разрешением 100-1000 м на акваториях сравнительно небольшого размера. Необходимые для расчетов граничные условия на открытых границах расчетной области генерируются в модели соответствующего моря. Результаты верификации прогнозов высоты значительных волн в Мировом океане по данным спутниковых альтиметрических наблюдений показывают успешные значения традиционных оценок точности прогнозов, сопоставимые с оценками ведущих прогностических центров.*

*Ключевые слова:* прогноз волнения, Мировой океан, моря России, модель WAWEWATCH-III, верификация прогнозов, спутниковая альтиметрия

**1. Введение**

Прогнозирование ветрового волнения относится к числу актуальных задач оперативной океанологии, связанных с информационным обеспечением разнообразной морской деятельности. Поэтому во многих мировых метеорологических и океанологических центрах, включая и Гидрометцентр России, действуют соответствующие оперативные прогностические системы. Исследования и технологические разработки, связанные с оперативным прогнозом ветрового волнения на национальном уровне, имеют длительную историю и ведутся в нескольких институтах (например, [3, 4,7,28,1,5,8]). Общая задача в части волновых прогнозов состоит в том, чтобы пользователям предоставлялась оперативная прогностическая информация по основным параметрам ветрового волнения с максимально возможной заблаговременностью и детализацией для акваторий океанов и всех российских морей. Однако действующие в настоящее время технологии не решают поставленную задачу в целом и обладают некоторыми общими ограничениями.

Среди них выделяется проблема прогностических расчетов волнения в ограниченных акваториях Мирового океана и окраинных морях для чего долгое время использовался подход с заданием фиксированных, недостаточно обоснованных, граничных условий. Но процессы развития волнения в различных частях океана и морей являются взаимосвязанными и искусственное вычленение из связки одного из объектов может существенно снижать адекватность моделирования ветрового волнения. Аналогичная ситуация имеет место и для прогнозов в прибрежной зоне морей. Современный подход к описанию ветрового волнения, как, впрочем, и других океанологических процессов, подразумевает комплексное использование сопряженных моделей “океан – море – прибрежная зона” в рамках единой технологии. Комплексный подход подразумевает также эффективное сопряжение технологических линий морских прогнозов с постоянно совершенствуемыми и обновляемыми метеорологическими системами, поставляющими сведения об атмосферных воздействиях на поверхности океанов и морей для прогностических расчетов волнения.

В Гидрометцентре России начиная с 2014 г. действует первая версия оперативной системы [1, 2], лишь частично решающая сформулированную выше общую задачу прогнозирования ветрового волнения. В настоящее время разработана опытная версия прогностической системы по сопряженной схеме “океан – море – прибрежная зона” на базе высокопроизводительной вычислительной платформы Cray XC40-LC[[3]](#footnote-3) и последних версий волновой модели, которая должна заменить действующую систему. В статье рассматриваются основные особенности этой комплексной системы прогнозирования волнения в океане и российских морях и обсуждаются результаты верификации базового звена системы — прогнозов для Мирового океана.

**2. Прогностическая модель**

К настоящему времени сформировался набор спектральных моделей ветрового волнения третьего поколения, успешно зарекомендовавших себя в прогностических приложениях. К таковым, в первую очередь, относятся модель WAM [29], модель WAWEWATCH-III [31] и модель SWAN [26]. В части физической формулировки моделей имеет место заметная конвергенция — постановка задачи, параметризации физических процессов, численные схемы и другие успешные компоненты моделей переходят от одной к другой из них и отмечается их общее сближение. В такой ситуации при выборе модели для применения в прогностических технологиях немаловажное значение приобретают свойства программного комплекса, реализующего модель. Именно по этим соображениям, с учетом опыта упомянутых предшествующих разработок, в новой системе прогнозирования ветрового волнения в качестве базовой применяется последняя на текущее время версия модели WAWEWATCH-III 6.07.1 (далее WW3).

***2.1 Конфигурация модели***

Исходное уравнение спектральных моделей третьего поколения, описывающее эволюцию ветровых волн, можно записать в компактной форме (подробнее см. [31]) следующим образом:

 (1)

где *N(k,θ)* – двумерный спектр плотности волнового действия в пространстве волновых чисел *k* и направлений распространения волн *θ; σ* – угловая частота волн; *D/Dt* – полная производная, её форма в покомпонентном виде для сферической системы координат приводится в [31]. В правой части уравнения (1) величиной *S(k,θ)* представлен совокупный вклад источников и стоков волновой энергии в различных спектральных диапазонах:

*S = Sin + Sds + Snl + Sbot + Sdb + Sice + …* (2)

В используемой нами конфигурации модели WW3 учитываются основные процессы развития ветрового волнения: приток энергии от ветра *(Sin)*, её диссипация на глубокой воде за счет обрушения волн (*Sds*), перераспределение энергии по спектру вследствие нелинейных взаимодействий по схеме параметризации DIA (*Snl*), затухание волн из-за донного трения (*Sbot*), прибойное обрушение волн на мелководье (*Sdb*) и взаимодействие волн с ледовым покровом по упрощенной параметризации IC0 (*Sice*).

Составляющие правую часть уравнения (1) слагаемыепредставляютсобой параметризации соответствующих процессов и нередко подвержены развитию и изменениям, а их формулы содержат ряд настроечных параметров. Значения некоторых из таких параметров не являются универсальными и при переходе к новым модельным конфигурациям в общем случае необходимо определение их оптимальных значений. Общее количество модельных параметров исчисляется десятками, но, к счастью, по большей их части сложился определенный консенсус и значения параметров в этой части являются устоявшимися. Сравнительно небольшое число наиболее важных параметров, связанных с особенностями используемой сеточной конфигурации модели и заданием форсинга модели, всякий раз при новом конфигурировании модели требуют уточнения. В первую очередь, такого рода настройка связана с параметризацией процессов поступления энергии за счет взаимодействия волн и ветра и её диссипации *Sin + Sds*. В используемой версии модели WW3 предусмотрены опции для схем параметризации этих процессов, так называемые ST-пакеты. В ходе конфигурирования модели опробовались несколько вариантов таких пакетов (табл. 1), результаты сопоставления которых приводятся далее в разделе 4. При этом во всех случаях применялась одинаковая дискретизация спектрального пространства: 25 частот в диапазоне 0,042 - 0,414 Гц и 36 направлений с шагом 10°.

Таблица 1

Сведения о параметризациях ветровой накачки энергии и её диссипации *Sin+ Sds*, используемых при конфигурировании прогностической модели

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Идентификатор  конфигурации | Версия прогностической системы ГМЦ | Версия модели WW3 | Пакет параметризации для *Sin+ Sds* | Источники схемы параметризации |
| ST3 | v1.3 | 3.14 | ST3  betamax=1,2 | [17,14] |
| ST4a | v2.0 | 6.07.1 | ST4  betamax=1,43 | [10, 18, 22] |
| ST4b | v2.0 | 6.07.1 | ST4  betamax=1,33 |
| ST6 | v2.0 | 6.07.1 | ST6  betamax=1,43 | [11, 24, 19] |

Наряду с настройкой физического блока модели в случае её оперативного применения большое значение имеют технологические аспекты прогностической системы. Сконструированная версия системы позволяет рассчитывать прогнозы с заблаговременностью до 15 суток. Однако информативный прогноз на такие сроки возможен только в рамках ансамблевого подхода, для реализации которого требуется многократное увеличение вычислительных ресурсов. Поэтому на данном этапе в комплексной системе реализуется расчет детерминированных 5-суточных прогнозов. Предусмотрен выпуск прогнозов четыре раза в сутки со стартовыми сроками 00, 06, 12, 18 час ВСВ.

В качестве начальных условий для интегрирования волновой модели в каждом прогностическом сеансе могут использоваться данные предшествующего прогноза спектров на 6-24 час или результаты предварительного диагностического расчета параметров волн на 6-12 час по полям анализов приводного ветра (вместо их прогнозов). В перспективе также предполагается исследование эффективности применения процедуры усвоения спутниковых данных наблюдений высоты значительных волн.

Прогностическая модель (WW3 v6.07.1) поддерживает богатый набор выходной информационной продукции, получаемой в ходе интегрирования модели. В используемой версии модели предоставляется возможность получения сведений о 87 параметрах собственно ветрового волнения и величинах, характеризующих процессы взаимодействия волн с атмосферой, верхним слоем океана и придонным пограничным слоем. В разработанной версии комплексной системы прогнозирования ветрового волнения в состав выходных данных, наряду с двумерными частотно-угловыми спектрами в заданных точках, входят поля следующих параметров:

* высота значительных волн, средняя длина волн, средний период волн и среднее направление волн для смешанного волнения (ветровые волны и зыбь);
* аналогичные наборы полей (высота, длина, период, направление) по отдельности для ветровых волн и двух систем волн зыби;
* пиковый период спектра для смешанного волнения, высота волн и их направление для пикового периода смешанного волнения;
* аналогичные наборы полей (период, высота, направление) по отдельности для пиковых периодов ветровых волн и волн зыби;
* составляющие скорости поверхностного стоксового дрейфа.

По мере необходимости этот состав прогностических параметров ветрового волнения может расширяться. Временная дискретность представления полей составляет 1-3 час и в значительной степени зависит от размеров расчетных сеток и доступных вычислительных ресурсов.

Система предусматривает распространение получаемой прогностической продукции в графическом и цифровом виде по Интернет технологиям подобно предшествующей версии системы[[4]](#footnote-4),[[5]](#footnote-5) с соответствующим расширением состава и форм представления оперативной информации.

***2.2 Сеточные конфигурации***

Расчетные модельные области, аппроксимирующие конфигурацию берегов и батиметрию реальных океанических и морских бассейнов, в прогностической модели определяются на наборе взаимосогласованных сеток. Они строились на базе известных цифровых массивов данных батиметрии: ETOPO1 [9] и GEBCO 2020 [27]. Для более точного задания береговой линии использовались выборки из иерархического набора географических полигонов GSHHS [30] с разным разрешением.

Применение волновых моделей в оперативных приложениях имеет определенную специфику. Конкурирующие между собой потребности повышения пространственного разрешения волновых моделей и минимизации времени, затрачиваемого на расчет прогнозов, предопределяют необходимость построения эффективной конфигурации взаимосогласованных моделей и, в первую очередь, их расчетных сеток. Этот вопрос тесно связан с конфигурированием расчетной модельной области в приполярных частях океана. При использовании единой или нескольких совмещенных регулярных широтно-долготных сеток по мере приближения к полюсу шаг сетки в метрическом измерении уменьшается, что, в силу требования устойчивости вычислительной схемы, ведет к неприемлемому уменьшению временного шага интегрирования модели.

Для решения этой проблемы в новой версии системы используется совмещение регулярной географической материнской сетки в низких и средних широтах с криволинейными приполярными сетками с разрешением близким к разрешению материнской сетки у её границ. В этом случае необходимо тем или иным образом сконструировать вычислительную сетку для полярных широт с близким к постоянному разрешению. Естественным и, по-видимому, самым простым подходом является построение такой сетки в стереографической проекции. Этот подход применялся в нескольких работах, в частности в [23] выполнен сравнительный анализ иерархии подобных сеточных наборов, названных авторами IRI (irregular – regular – irregular) сетками. По такой схеме для нашей комплексной системы были построены сеточные конфигурации (табл. 2), предназначенные для глобальных расчетов параметров ветрового волнения в Мировом океане.

Таблица 2

Спецификации составных сеточных конфигураций типа IRI, используемых для расчетов параметров ветрового волнения в Мировом океане

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Идентификатор (ID) сетки | Тип сетки | Широтный диапазон | Разрешение | Время счета прогноза на 5 суток |
| *nps10km* | стереогр. | 60° - 89° с. ш. | ~10 км | 18 мин |
| *reg12mn* | географич. | 55° ю.ш. - 65° с.ш. | 0,2° (~20 км) |
| *sps15km* | стереогр. | 50° - 80° ю. ш. | ~15 км |

Расположение узлов полярных сеток *nps10km* и *sps15km* на земной поверхности иллюстрирует рис. 1 (для наглядности сетки прорежены). Границы приполярных сеток формируются на кругах широты (табл.2): граничными определяются узлы ближайшие к соответствующему широтному кругу. Регулярная географическая сетка и смежные с ней полярные сетки, являющиеся на земной поверхности криволинейными сетками, частично перекрываются и в зонах перекрытия обеспечивается их двустороннее взаимодействие: при расчетах модели на сетке с более грубым горизонтальным разрешением спектры с мелкой сетки усредняются и, наоборот, для сетки с более высоким разрешением волновые спектры интерполируются с более грубой сетки. При этом учитывается направление потоков волновой энергии. Построение совмещенных сеток обеспечивает сравнительно однородное пространственное разрешение (~10-20 км) для всей глобальной области, причем, в отличие от широтно-долготных сеток, данная конфигурация характеризуется гораздо большей изотропностью расчетных ячеек. Расчет глобальных параметров волнения для такой конфигурации, объединяющей модели на регулярной и криволинейных сетках, проводится в рамках единой вычислительной задачи (режим *multigrid*). Реализация этой опции относится к одной из наиболее сильных сторон модели WW3.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1. Расположение узлов полярных частей сеточной области, используемых для расчетов параметров ветрового волнения в глобальной области Мирового океана (показан каждый 20-й узел сетки). |

Характерные масштабы пространственно-временной изменчивости волнения в морях меньше океанических масштабов, поэтому для моделирования и прогнозирования параметров ветрового волнения необходимо пространственное разрешение ~1-5 км. Из 13-ти морей к которым территории России имеет выход, с точки зрения описания процессов эволюции ветрового волнения к внутренним морям, наряду с Каспийским, можно также отнести Черное и Балтийское моря, которые отделены от смежных акваторий сравнительно узкими проливами не являющимися, как правило, источниками значительного волнения. Остальные моря относятся к типу окраинных и принадлежат к бассейнам трех океанов. Если прогностические модели для внутренних морей можно строить независимо от других водных объектов, то для второй группы морей необходимо учитывать влияние указанных океанических акваторий. Схожая ситуация имеет место и для описания волновых процессов в прибрежной зоне, где требуется ещё более высокое разрешение, чем для открытого моря. То есть, очевидно, что адекватная прогностическая система для расчетов параметров ветрового волнения в российских морях должна строиться на основе сопряженной схемы “океан–море–прибрежная зона”. По этой схеме модели морей получают граничные условия от океанической модели, а модели прибрежной зоны — от соответствующей морской модели.

Основные характеристики сеточных конфигураций для российских морей, используемые в комплексной прогностической системе представлены в табл. 3, где также приводится процессорное время, требуемое для расчета 5-суточного прогноза на 576 вычислительных ядрах. Прогнозы для Черного, Азовского морей и Керченского пролива и, по аналогии, для Каспийского моря и его северной части рассчитываются в режиме сопряженных (*multigrid*) сеток, в котором не требуется явного задания граничных условий. Хотя совокупное время счета по морям составляет существенную величину (табл. 3), при доступных вычислительных ресурсах возможен параллельный счет задач для нескольких регионов. При этом суммарное время расчета прогнозов для океана и всех морей составляет около 40 мин, что вполне приемлемо для прогностических приложений, учитывая большой охват географических объектов.

Таблица 3

Модельные параметры сеточных конфигураций для прогностических расчетов параметров ветрового волнения в морях России

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Регион | ID  сетки | Тип сетки | Разрешение | Сетка генерации гр. условий | Время счета прогноза на 5 суток  (мин) |
| Арктические моря | *arc* | стереог. | ~5 км | *reg12mn* | 20 |
| Белое море | *bel* | геогр. | ~1 км | *nps10km* | 12 |
| Балтийское море | *balt* | геогр. | ~2 км | *reg12mn* | 10 |
| Берингово море | *bering* | геогр. | ~5 км | *reg12mn* | 6 |
| Японское и Охотское моря | *JapOhot* | геогр. | ~5 км | *reg12mn* | 6 |
| Черное море Азовское море  Керченский пр. | *black*  *azov*  *kerch* | геогр.  геогр.  геогр. | ~4 км  ~1 км  ~0,5 км | —  —  — | 15 |
| Каспийское море Северный Каспий | *casp*  *caspn* | геогр.  геогр. | ~2 км  ~1 км | —  — | 18 |

Для повышения точности прогнозов ветрового волнения в прибрежной зоне (заливы, бухты, проливы, акватории портов и т.п.) требуется разрешение, вплоть до значений порядка 100 м. Эта задача решается в комплексной прогностической системе путем применения сопряженных неструктурированных (триангуляционных) сеток, поддерживаемых моделью WW3, которые позволяют гибким образом варьировать разрешение сетки в зависимости от заданного шага вдоль берега [21]. Такие сетки были построены на основе батиметрических данных массива GEBCO 2020 [27] и навигационных карт масштабов 1:500000 – 1:100000 с использованием специализированного пакета Surface Modelling System [25]. На рис. 2 показано расположение узлов сводной конфигурации неструктурных сеток для российских морей, а в табл. 4 представлены основные характеристики сеток по отдельным морям.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.2. Положение узлов неструктурных сеток с переменным разрешением для российских морей. Цветная окраска показывает глубины в узлах сетки. В областях визуально сливающегося сгущения узлов разрешение сетки менее 1000 м. |

Задача моделирования прибрежной зоны в такой единой сеточной конфигурации для всех окраинных морей применительно к оперативным приложениям вряд ли будет реализуема в ближайшие годы (см., например, [15]). Поэтому в нашей системе прогнозирования волнения принят другой подход — детализация прогнозов производится на локальных неструктурных конфигурациях модели с разрешением 100-1000 м, построенных для требуемых акваторий сравнительно небольшого размера. При этом необходимые для расчетов граничные условия на открытых границах области генерируются в модели соответствующего моря (табл. 3).

Построенные сеточные конфигурации для комплексной системы прогнозирования ветрового волнения позволяют проводить взаимосогласованные расчеты волновых характеристик в широком диапазоне пространственно-временных масштабов по сопряженной технологической схеме “океан-море-прибрежная зона”.

Таблица 4

Основные характеристики вычислительных неструктурных сеток для российских морей

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Моря | Количество узлов | Разрешение в прибрежной зоне | Разрешение в открытом море | Примечание |
| Карское, Баренцево | 37729 | ~700 м | 10–20 км | Включена Северная Атлантика |
| Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское | 36176 | ~800 м | 10–15 км | Северный Ледовитый океан до 87 ° с. ш., включено море Бофорта |
| Берингово, Охотское, Японское | 69333 | ~1000 м | 15–25 км | Включена северная часть Тихого океана от 20° с. ш. |
| Черное, Азовское | 59690 | ~300 м | 5–10 км |  |
| Каспийское | 17529 | ~800 м | 10 км |  |
| Балтийское | 34985 | ~400 м | 10 км |  |
| Белое | 26587 | ~400 м | 10 км | Включено Баренцево море |

***2.3 Прогностический форсинг***

Для задания метеорологических условий на морской поверхности (скорость ветра на высоте 10 м и поля сплоченности морского льда), требуемых для расчетов по волновой модели, используется несколько источников оперативной информации. Комплексный характер прогностической системы подразумевает поддержание наборов входных данных с различающимися характеристикам, в первую очередь — с разным пространственно-временным разрешением, которое должно согласовываться с разрешением соответствующей волновой модели. С учетом этой специфики, были разработаны технологические линии для создания и актуализации соответствующих наборов данных прогностического форсинга для волновых моделей. На данном этапе действуют технологические линии генерации прогностического форсинга на базе источников оперативной информации, основные спецификации которых представлены в табл. 5.

Таблица 5

Основные характеристики продукции метеоцентров, используемой для задания атмосферного форсинга в системе прогнозирования ветрового волнения

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Прогностическая система,  Выпускающий центр | Регионы  прогноза ВВ | Разреше-ние  (км) | Стартовые сроки прогноза  (час ВСВ) | Заблаговре-менность прогнозов  (час) | Дискрет-ность  (час) |
| ПЛАВ-10  Гидрометцентр | Океан,  моря РФ | ~ 10 | 00, 12 | 0-120 | 3 |
| GFS  NCEP | Океан,  моря РФ | ~ 13 | 00, 06, 12, 18 | 0-240 | 1-3 |
| ICON  DWD | Океан,  моря РФ | ~ 14 | 00, 06, 12, 18 | 0-180 | 1-3 |
| COSMO-RU\_ENA  Гидрометцентр | Моря РФ | 6,6 | 00, 12, 06, 18 | 0-78 | 1 |
| COSMO-RU\_2  Гидрометцентр | Азовское  море | 2,2 | 00, 12, 06, 18 | 0-48 | 1 |

Как видно из таблицы, имеет место перекрытие продукции разных центров. Такое дублирование источников метеорологических прогнозов предусмотрено для повышения надежности функционирования системы прогнозирования волнения в случаях перебоев поступления текущей информации. При своевременном поступлении оперативных данных из нескольких метеорологических систем приоритет отдается продукции с более высокими характеристиками оправдываемости прогнозов полей ветра по данным регулярного мониторинга их качества.

**3. Верификация прогнозов**

Получаемые для прогностических расчетов статистические показатели точности воспроизведения волновых параметров относятся к главным индикаторам успешности каждой прогностической системы. По этой причине Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) поддерживает регулярный мониторинг точности продукции около 10 основных прогностических систем ветрового волнения в Мировом океане. С начала 2000-х годов эту деятельность осуществляла Совместная комиссией ВМО и МОК по океанографии и морской метеорологии [12] а с 2018 г, после упразднения комиссии, роль координатора перешла к ЕЦСПП[[6]](#footnote-6).

В настоящее время основу наблюдательной системы для ветрового волнения, обеспечивающей регулярное поступление информации в глобальном масштабе, составляют спутниковые альтиметрические измерения. Данные спутниковых наблюдений обрабатывают и распространяют несколько крупных специализированных центров. В нашем случае был выбран один из поддерживаемых в квазиоперативном режиме информационных продуктов — глобальная сводка альтиметрических измерений высоты волн и скорости приводного ветра [20], выполняемых в составе нескольких, действующих на текущий момент, спутниковых миссий. Этот архив содержит данные трековых альтиметрических измерений высоты значительных волн (*SWH*) и модуля скорости ветра на высоте 10 м. Измерения со спутников проводятся через равные промежутки времени так что пространственное разрешение данных наблюдений вдоль трека составляет около 7 км. В настоящее время архив объединяет информацию, поступающую с альтиметров, действующих в рамках девяти спутниковых миссий. Данные наблюдений имеются, начиная с 1 января 2020 г. и пополняются в режиме близком к реальному времени. Эти данные, включающие время и координаты вдольтрековых измерений, значения *SWH* и скорости ветра, сгруппированы в файлы для трехчасовых интервалов (0-3, 3-6, …, 21-24 час ВСВ) по каждой спутниковой миссии.

Для оценки точности модельных расчетов, как диагностических, так и прогностических, применяется множество статистических критериев. Но в случае систем численного прогноза ветрового волнения для их взаимного сопоставления, как уже отмечалось, под эгидой ВМО сложился подход с использованием небольшого числа простых показателей качества прогностических полей [13]. В базовый набор статистических оценок входят средняя ошибка или смещение (*BIAS*), среднеквадратическая ошибка (*RMSE*), индекс рассеяния (*SI*) и коэффициент корреляции (*COR*), рассчитываемых по набору точечных коллокаций наблюдение-прогноз[[7]](#footnote-7), для которых прогностическое значение обычно определяется линейной интерполяцией сеточного поля в точку наблюдения. На национальном уровне используется еще один показатель точности прогностических полей – общая оправдываемость прогнозов (*OPR*) для тех же коллокаций [6]:

*OPR = (m/n*)\*100, (3)

где *m* – количество точек коллокаций с оправдавшимися прогнозами, *n* – общее количество коллокаций. При поточечном сравнении оправдавшимися считаются прогнозы, отличающиеся от измерений не более чем на 30%. Для океанических прогнозов в эту оценку здесь включались случаи, в которых наблюдаемая высота волн превышала 1 м.

**4. Результаты верификации прогнозов для океана**

В данной статье рассматриваются результаты оценки точности прогнозов ветрового волнения для Мирового океана. Результаты верификации прогнозов для российских морей и отдельных акваторий их прибрежной зоны будут представлены в других публикациях. Глобальные прогнозы являются ключевым звеном комплексной прогностической системы, построенной по сопряженной схеме “океан-море-прибрежная зона”, поэтому их качество в немалой степени определяет успешность прогнозов в окраинных морях и их прибрежных зонах.

Оценки проведены на материалах ретроспективных прогнозов высоты значительных волн *SWH*, сопоставляемых с указанными выше данными спутниковых измерений. Использован годовой ряд (01.01.23-31.12.23) ежесуточных прогнозов на 120 час вперёд от 00 ВСВ, рассчитанных по прогностическим полям приводного ветра из оперативной продукции системы GFS (табл. 5). Дискретность вывода прогностических полей (заблаговременностей прогноза) для каждого прогностического расчета составляет 3 час.

Следует учитывать, что в задачи верификации входит сопоставление результатов рассматриваемой и предшествующей версий прогностической системы, использующих разные сетки, и что в новой системе глобальная расчетная область является объединением трех сеток (табл. 2). Поэтому для упрощения процедуры сопоставления в каждом случае прогностических расчетов полученные волновые спектры интерполировались на единую глобальную сетку с разрешением 0,2°×0,2° и поля высоты волн именно на этой сетке использовались для вычисления оценок. В дальнейшем предполагается проведение дополнительной верификации отдельно для полярных сеточных областей с их исходным разрешением.

Для упоминавшейся в разделе 2 калибрации конфигурации модели выполнены четыре серии прогностических расчетов с единым ветровым форсингом: одна серия для предшествующей версии прогностической системы и три серии прогнозов для рассматриваемой здесь новой версии, различающихся только вариантами параметризаций процессов ветровой накачки (табл. 1). Полученные в этих расчетах показатели точности прогнозов *SWH* на третьи сутки представлены на рис. 3.

По всем используемым метрикам наиболее успешными оказываются прогнозы, полученные в конфигурации модели WW3 с параметризацией для процессов поступления энергии ветра к волнам и её диссипации за счет обрушения волн на глубокой воде (члены *Sin+ Sds* в уравнениях (1) - (2)) по схеме ST4 [10*,* 22] со значением настроечного параметра *betamax*=1,33. Различия в поведении коэффициентов корреляции для всех конфигураций (не показанные на рис. 3) невелики и составляют ~0,002, за исключением конфигурации предшествующей системы для которой значения *COR* оказываются примерно на 0,02 меньшими. Особо следует отметить существенное снижение оценок для предшествующей версии системы (черные кривые на рис. 3), наиболее выраженное в значениях метрик *BIAS*, *RMSE* и *OPR*. Таким образом, результаты калибрации, представленные на рис. 3, служат основанием для использования конфигурации ST4b (по табл.1) в качестве базовой для комплексной системы прогнозирования параметров волнения. Дальнейшие оценки точности прогнозов проводились именно для этой конфигурации модели.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3. Помесячные оценки показателей точности прогнозов высоты значительных волн на третьи сутки (заблаговременности прогнозов 48 – 72 час) вперёд от 00 ч ВСВ для четырех вариантов конфигурации прогностической модели, представленных в табл. 1: (*а*) – средняя ошибка (смещение); (*б*) – среднеквадратическая ошибка; (*в*) – индекс рассеяния; (*г*) – оправдываемость прогнозов по формуле (3).  Оценки получены на основе сопоставления результатов ежесуточных прогнозов за период 01.01.23 – 31.12.23 с данными спутниковых альтиметрических наблюдений. |

Присущее гидрометеорологическим прогнозам неотъемлемое свойство – уменьшение их точности с ростом прогностической заблаговременности – подразумевает необходимость получения комплекса оценок для разных прогностических интервалов времени. В связи с этим для расчетов оценочных статистик вначале прогнозы и данные наблюдений группировались в месячные наборы, в каждом из которых формировались выборки для пяти суточных интервалов заблаговременностей – от первых до пятых суток. То есть в первую выборку входят прогностические поля для заблаговременностей 0, 3, 6, …, 24 час, во вторую – 24, 27, 30, …, 48 час и т.д. Такой подход несколько “размазывает” результаты оценок по сравнению с расчетом для каждой конкретной заблаговременности 0, 3, 6, …, 120 час, но позволяет существенно увеличить размеры выборок и географическое покрытие для точечных коллокаций наблюдение-прогноз. Полученные таким образом оценки метрик для обобщенных суточных заблаговременностей прогноза высоты волн приведены на рис. 4.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 4. Помесячные оценки показателей точности прогнозов высоты значительных волн для заблаговременностей от первых до пятых суток, полученные в базовой модельной конфигурации ST4b: (*а*) – средняя ошибка (смещение); (*б*) – среднеквадратическая ошибка; (*в*) – индекс рассеяния; (*г*) – коэффициент корреляции; (*д*) – оправдываемость прогнозов по формуле (3); (е) – размерности месячных выборок (количество коллокаций наблюдение – прогноз) в миллионах. Цвет кривых маркирует заблаговременность прогнозов в сутках.  Оценки получены на основе сопоставления результатов ежесуточных прогнозов за период 01.01.23 – 31.12.23 с данными спутниковых альтиметрических наблюдений. |

Средняя ошибка прогнозов (рис. 4а) слабо зависит от их заблаговременности, а на годовом временном интервале эта зависимость имеет перемежающийся характер. Остальные же метрики (рис. 4б-4д) демонстрируют хорошо выраженное спадание точности прогнозов по мере увеличения их заблаговременности от первых до пятых суток. Причем это нарастание ошибок прогнозов особенно проявляется на четвертые и пятые сутки прогностического интервала. Для всех метрик, представленных на рис. 4, на протяжении года имеют место сравнительно небольшие взаимосогласованные вариации. В целом, полученные характеристики точности глобальных прогнозов высоты значительных волн находятся в неплохом количественном согласии с оценками точности прогнозов *SWH* по данным волновых буёв для набора прогностических систем, участвующих в проекте WMO по верификации прогнозов параметров ветрового волнения [16].

**5. Заключение**

Комплексная система прогнозирования ветрового волнения, разработанная по сопряженной технологии “океан – море – прибрежная зона”, представляет собой существенное развитие предшествующей, и пока действующей в оперативном режиме, версии прогностической системы [1]. Основной особенностью разработки является направленность на прогнозирование ветрового волнения, как по акватории Мирового океана, так и по акваториям всех российских морей, на базе высокопроизводительного вычислительного комплекса Cray XC40-LC и новой версии волновой модели WAVEWATCH III v.6.07.1.

Повышенные требования к срокам готовности прогнозов, свойственные всем оперативным системам, обусловливают необходимость построения эффективной конфигурации взаимосогласованных моделей и, в первую очередь, их расчетных сеток. Глобальная сеточная конфигурация модели WW3 для прогнозов волнения в Мировом океане, построенная на основе сопряжения криволинейных координат в приполярных областях с географическими координатами в средних широтах, позволяет рассчитывать параметры океанического ветрового волнения с достаточно однородным и изотропным разрешением 10-20 км. Эта же модель генерирует граничные условия, необходимые для расчета прогнозов волнения в окраинных морях с повышенным до 1-5 км разрешением таким образом, что общие затраты времени на расчет океанических и морских прогнозов составляют около 40 мин, что приемлемо для оперативных приложений.

Для адекватного описания волновых процессов в прибрежной зоне необходимо ещё более высокое разрешение, для чего в комплексной прогностической системе применяются неструктурные (триангуляционные) сетки, поддерживаемые моделью WW3, в которых разрешение сетки варьируется в зависимости от глубины. Детализация прогнозов производится на локальных конфигурациях модели с переменным разрешением 100-1000 м, построенных для требуемых акваторий сравнительно небольшой протяженности. При этом требуемые для расчетов граничные условия на открытых границах области генерируются в океанической или морской модели более высокого ранга (материнской модели). Эта схема применима для условий распределенных вычислений, особенно выигрышной, когда материнская модель является громоздкой в вычислительном отношении. В таких случаях ресурсоемкие вычисления проводятся в центре, обладающем такими ресурсами, а генерируемые в ходе интегрирования материнской модели массивы граничных условий оперативно передаются в соответствующие удалённые центры, поддерживающие взаимосогласованные версии прогностических моделей. Подобный подход применим для выпуска прогнозов в интересах территориальных УГМС Росгидромета, которым зачастую требуется прогностическая информация о ветровом волнении для ограниченных по площади морских районов.

Полученные результаты верификации прогнозов высоты значительных волн в Мировом океане по данным спутниковых альтиметрических наблюдений показывают достаточно успешные значения традиционных оценок точности прогнозов, сопоставимые с оценками ведущих прогностических центров. Отдельно следует отметить, что представленная здесь прогностическая система по показателям успешности прогнозов заметно превосходит предшествующую версию системы. Начиная с 2024 г. опытная версия комплексной системы прогнозирования ветрового волнения действует в квазиоперативном режиме, с ежедневным выпуском прогнозов от 00 час ВСВ, и проходит ведомственную сертификацию по принятым в Росгидромете процедурам.

**Литература**

**1. Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л.** Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России. — Труды Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова. Исследование океанов и морей, 2014, вып. 215, с. 90–101.

**2. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С.** Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане. — Информационный сборник. Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов, 2016, № 43, с. 133–147.

**3. Лавренов И.В.** Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. — СПб., Гидрометеоиздат, 1998, 499 с.

**4. Матушевский Г.В., Кабатченко И.М.** Теоретические и прикладные аспекты применения спектральных моделей ветрового волнения. — Метеорология и гидрология, 2003, № 1, с. 47-54.

**5. Мысленков С.А., Столярова Е.В., Архипкин В.С.** Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах. — Информационный сборник. Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов, 2017, № 44, с. 126–135.

**6. Наставление по службе прогнозов**. Раздел 3, часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. РД 52.27.759–2011. — М., 2011, 201 с.

**7. Нестеров Е.С., Абузяров З.К., Григорьева Г.А., Давидан И.Н., Дымов В.И., Пасечник Т.А.** Оценка точности расчета смешанного волнения в океане по современным численным моделям. — Метеорология и гидрология, 2011, № 10, с. 44-52.

**8. Ратнер Ю.Б., Фомин В.В., Иванчик А.М., Иванчик М.В.** Система оперативного прогноза ветрового волнения Черноморского центра морских прогнозов. — Морской гидрофизический журнал, 2017, № 5, с. 56–66.

**9. Amante C. and Eakins B.W.** ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. — NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. 2009.

**10. Ardhuin F., Rogers W. E., Babanin A. V., Filipot J., Magne R., Roland A., van der Westhuysen A., Queffeulou P., Lefevre J., Aouf L., and Collard F.** Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation. — J. Phys. Oceanogr., 2010, vol. 40, No 1, pp. 917–1,941.

**11. Babanin A. V.** Breaking and dissipation of ocean surface waves. — Cambridge University Press, 2011, 480 p.

**12. Bidlot J.-R., Holmes D. J., Wittmann P. A., Lalbeharry R., Chen H. S.** Intercomparison of the performance of operational ocean wave forecasting systems with buoy data. — Wea. Forecasting, 2002, vol. 17, pp. 287-310.

**13. Bidlot J.R. and Holt M.W.** Verification of operational global and regional wave forecasting systems against measurements from moored buoys. — JCOMM Technical Report, 2006, No 30, 15 p.

**14. Bidlot J. R., Janssen P. A. E. M., and Abdalla S.** A revised formulation of ocean wave dissipation and its model impact. — Tech. Rep. Memorandum 509, ECMWF, Reading, U. K. 2007.

**15. Brus S.R., WolframP.J., Van Roekel L.P., Meixner J.D.** Unstructured global to coastal wave modeling for the Energy Exascale Earth System Model usingWAVEWATCH III version 6.07. — Geosci. Model Dev., 2021, vol 14, pp. 2917–2938; https://doi.org/10.5194/gmd-14-2917-2021

**16. Intercomparison of operational wave forecasting systems against in-situ observations for SON 2023** - 00UTC runs only, Part I: Significant wave height. — WMO Lead Centre for Wave Forecast Verification, 2023, ECMWF, 61p; <https://confluence.ecmwf.int/display/WLW/Significant+wave+height>

**17. Janssen P. A. E. M.** The interaction of ocean waves and wind. — Cambridge University Press, 2004, 300 p.

**18. Leckler F., F. Ardhuin, C. Peureux, A. Benetazzo, F. Bergamasco, and V. Dulov.** Analysis and interpretation of frequency-wavenumber spectra of young wind waves. — J. Phys. Oceanogr., 2015, vol. 45, pp. 2484–2496; doi:10.1175/JPO-D-14-0237.1.

**19. Liu Q., Rogers W. E., Babanin A. V., Young I. R., Romero L., Zieger S., Qiao F., and Guan C.** Observation-based source terms in the third generation wave model WAVEWATCH III: updates and verification. — J. Phys. Oceanogr., 2019, vol. 49, No 2, pp 489–517.

**20. Mertz F., Husson R., Taburet N., Charles T., and Estimbre J.J.** Product user manual for Near-Real-Time Satellite Wave Products WAVE\_GLO\_PHY\_SWH\_L3\_NRT\_014\_001. 2022. <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-WAV-PUM-014-001-002-003-004.pdf>

**21. Myslenkov, S., Samsonov, T., Shurygina, A., Kiseleva, S., and Arkhipkin, V.** Wind waves web atlas of the Russian seas. — Water, 2023, vol. 15, No 11, 2036.

**22. Rascle, N., and Ardhuin F.** A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization. — Ocean Mod., 2013, vol. 70, pp. 174–188.

**23. Rogers W.E., and Linzell R.S.** The IRI grid system for use with WAVE-WATCH III®. — Tech. Rep. Stennis Space Center, MS 39529-5004: Naval Re1486 search Laboratory. 2018.

**24. Rogers W. E., Babanin A. V., and Wang D. W.** Observation consistent input and whitecapping dissipation in a model for wind generated surface waves: Description and simple calculations. — J. Atmos. Oceanic Techn., 2012, vol. 29, No 1, pp. 329–346.

**25. SMS 13.0 Tutorial. Mesh Generation.** — Aquaveo, 2017, 14 pp.; http://smstutorials-13.0.aquaveo.com/SMS\_MeshGeneration.pdf

**26. SWAN team.** — SWAN user manual, 2010;<http://www.swan.tudelft.nl>

**27. Tozer B., Sandwell D. T., Smith W. H. F., Olson C., Beale J. R., and Wessel P.** Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+. — Earth and Space Science, 2019, vol. 6, No 10, pp. 1847-1864.

**28. Vrazhkin A.N.** Application of spectral wave model for some areas of the Far Eastern Seas and the Pacific Ocean. — Pacific Oceanography, 2013, vol. 6, No. 1, pp. 5-9.

**29. WAMDI group: Hasselmann S., Hasselmann K., Bauer E., Janssen P.A.E.M., Komen G.J., Bertotti L., Lionello P., Guillaume A., Cardone V.C., Greenwood J.A., Reistad M., Zambresky L., and Ewing J.A.**The WAM model – a third generation ocean wave prediction model. — J. Phys. Oceanogr., 1988, vol. 18, pp. 1775–1810.

**30. Wessel P. and Smith W.H.F.** A Global, Self-consistent, Hierarchical, High-Resolution Shoreline Database. — J. Geophys. Res., 1996, vol. 101, pp. 8741–8743.

**31. WW3DG (The WAVEWATCH III® Development Group)**. User manual and system documentation of WAVEWATCH III® vers. 6.07. — Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB. College Park. MD, USA, 465 pp. + Appendices.

**Complex system for wind wave forecasting in the World Ocean and Russian seas**

A.A. Zelenko, S.A.Myslenkov, Yu.D. Resnyanskii, B.S. Strukov, M.Yu. Zaichenko

The article describes a system of wind wave forecasting in the World Ocean, which represents a significant development of the operational forecast technology operating at the Hydrometeorological Center of Russia since 2014. The system is built according to the conjugate “ocean – sea – coastal zone” scheme designed for making forecasts over the entire World Ocean and individual basins of all Russian seas. The developed model configurations make it possible to calculate wave parameters with a horizontal resolution of 10-20 km in the oceans and 1-5 km in the seas of Russia. To detail forecasts in the coastal zone of the seas, non-structured triangulation grids with a horizontal resolution of 100-1000 m are used in water areas of relatively small size. The boundary conditions at the open boundaries of the computational domain, which are necessary for calculations, are generated in the model of the corresponding sea. The results of the forecasts verification of the significant wave height over the World Ocean based on satellite altimetry observations show successful values of traditional forecast accuracy indicators being comparable to those of leading forecast centers.

*Keywords:* wave forecasting, World Ocean, Russian seas, WAWEWATCH-III model, forecast verification, satellite altimetry

1. Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации [↑](#footnote-ref-1)
2. Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова [↑](#footnote-ref-2)
3. <https://mcc.meteorf.ru/oborudovanie.html> [↑](#footnote-ref-3)
4. <http://hmc.meteorf.ru/sea> [↑](#footnote-ref-4)
5. <http://esimo.ru/portal> [↑](#footnote-ref-5)
6. <https://confluence.ecmwf.int/display/WLW/Project> [↑](#footnote-ref-6)
7. Под коллокацией понимается пара значений параметра волнения (наблюдаемое и прогнозируемое), относящихся к конкретной географической точке в конкретный момент времени. [↑](#footnote-ref-7)