

А.А. Зеленко, Ю.Д. Реснянский, Б.С. Струков

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

Введение

Информация о ветровых волнах, оказывающих существенное влияние на морской транспорт, гидротехнические сооружения, добывающие платформы, морской промысел, рекреационные комплексы представляет интерес для многих субъектов морской хозяйственной деятельности. Такая информация подразделяется на две основные категории: режимную и оперативную. Под режимной информацией понимаются статистические характеристики ветровых волн, относящиеся к длительным интервалам времени (климат или режим волн) [4]. Под оперативной информацией – сведения о текущем и ожидаемом на интервале нескольких суток состоянии поля ветровых волн (диагноз и прогноз).

Современные подходы к прогнозированию ветровых волн, как, впрочем, все чаще и для оценки режимных характеристик, основываются на численных гидродинамических моделях. Наибольшее распространение получили так называемые спектральные модели, основанные на численном решении сеточными методами уравнения баланса волновой энергии или волнового действия в спектральной форме [2, 4, 21, 24, 26].

Одна из таких моделей используется в комплексной системе прогнозирования ветрового волнения в океане и российских морях, развиваемой в Гидрометцентре России с 2010 г. Результаты испытаний системы для акваторий Черного, Азовского, Каспийского и Балтийского морей представлены в [1, 5, 20, 29]. По данным проведенных

испытаний оправдываемость прогнозов высоты волн для этих акваторий, оцениваемая в соответствии с действующим Наставлением [3], изменялась от 87,3–94,6 % для прогнозов на первые сутки, до 71,6–81,1 % для прогнозов на пятые сутки. Снижение качества прогнозов с увеличением заблаговременности в значительной степени определялось увеличением ошибок прогностических данных о скорости ветра, используемых в качестве входной информации в расчетной модели ветрового волнения.

В данной статье излагаются результаты испытания прогностической системы, проведенного для акватории Мирового океана.

1. Система прогнозирования

1.1. Волновая модель и расчетные параметры

В системе прогнозирования ветрового волнения, развиваемой в ФГБУ «Гидрометцентр России», в качестве расчетного ядра используется одна из спектральных моделей, известная под названием WaveWatch III v 3.14 [24]. Расчет осуществляется путем интегрирования уравнения для спектральной плотности волнового действия $N(f, \theta; \lambda, \phi, t)$, являющейся функцией частоты $f = \sigma / 2\pi$, направления распространения θ , географических координат (λ, ϕ) и времени t .

Для случая, в котором не учитывается зависимость поля волн от средних течений (связанные с течениями доплеровские эффекты), расчетное уравнение в сферической системе координат записывается следующим образом [24]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma}, \quad (1)$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta}{R}, \quad (2)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta}{R \cos \phi}, \quad (3)$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s}, \quad (4)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m}, \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R}, \quad (6)$$

где λ – географическая долгота; ϕ – широта; R – радиус Земли; k – волновое число, связанное с частотой $\sigma = 2\pi f$ дисперсионным соотношением для линейных волн $\sigma^2 = gk \tanh kd$; d – глубина моря; g – ускорение свободного падения; S – координата в направлении θ ; m – координата в направлении, нормальном к θ ; $c_g = \partial \sigma / \partial k$ – групповая скорость, определяемая из того же дисперсионного соотношения; S – совокупный вклад источников и стоков энергии волн в различных спектральных диапазонах (ветровая накачка, диссипация, нелинейные взаимодействия, придонное трение и др.).

Из множества предлагаемых в пакете WaveWatch III вариантов описания различных механизмов развития и эволюции волн (представляемых членом источников S) выбран вариант параметризации ветрового воздействия и диссипации WAM4 с набором параметров WAJ [24].

Расчетная область той части прогностической системы, которая обеспечивает составление прогнозов для акватории Мирового океана, построена по данным цифрового массива ETOPO [7]. Для задания береговой линии использовалась выборка из набора географических полигонов GSHHS (Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shorelines) с разрешением, соответствующим масштабу карты 1:250000 [28].

Расчет проводится на регулярной широтно-долготной сетке с шагами $\Delta\lambda = 0,5^\circ$, $\Delta\phi = 0,5^\circ$ ($\sim 50 \times 50$ км) для основной части области, $\phi = 87^\circ$ ю. ш. – 78° с. ш.; и на сопряженной с основной сетке с шагами $\Delta\lambda = 0,25^\circ$, $\Delta\phi = 0,1^\circ$ ($\sim 10 \times 10$ км) для Арктического бассейна, $\phi = 66$ – 83° с. ш. Непрерывный волновой спектр $N(\sigma, \theta; \lambda, \phi, t)$ аппроксимируется 24 дискретными направлениями распространения θ_k с равномерным шагом $\Delta\theta = 15^\circ$ и 25 дискретными частотами $f_l = \sigma_l / 2\pi$, задаваемыми членами геометрической прогрессии с начальным значением 0,042 Гц и знаменателем 1,1. Получаемая в результате

расчетов спектральная плотность волнового действия $N(f_i, \theta_k; \lambda, \phi, t)$ служит исходной для определения производных величин, представляющих практический интерес для потребителей морской информации, таких как высота значительных волн (англ. significant wave height, SWH), средние по спектру периоды и длины волн, направления распространения ветровых волн и волн зыби, пиковые частоты волн и др.

1.2. Источники входной информации

Входной информацией для модели ветрового волнения, помимо батиметрических данных, использовавшихся для конфигурирования расчетной области, служат метеорологические данные о скорости ветра (приведенной к высоте 10 м), температуре воды и воздуха, а также сведения о сплоченности морских льдов, оказывающих существенное влияние на развитие волн. При сплоченности свыше 5 баллов развитие волн полагается полностью подавляющимся.

В качестве источника метеорологических данных используется продукция двух глобальных прогностических моделей – ПЛАВ и GFS. Полулагранжева модель ПЛАВ, разработанная в Гидрометцентре России совместно с ИВМ РАН [6], решением ЦМКП Росгидромета от 2.04.2009 г. рекомендована к внедрению в Гидрометцентре России для прогноза полей приземного ветра. Горизонтальное разрешение метеорологических полей составляет $\sim 0,9^\circ \times 0,7^\circ$; дискретность по времени – 3 часа.

Выходная продукция системы GFS (Global Forecasting System), функционирующей в метеорологическом центре NCEP/NOAA (США) [17], поступает в оперативном режиме в Гидрометцентр России по специализированным каналам (Интернет-2). Горизонтальное разрешение этих данных составляло $\sim 0,2^\circ \times 0,2^\circ$ (~ 27 км) до 14.01.2015 г. и $\sim 0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (~ 13 км) с 15.01.2015 г.; дискретность по времени – 3 часа.

Дублирование источников метеорологического прогноза предусмотрено для повышения надежности функционирования системы прогнозирования волнения. При поступлении оперативных данных из нескольких метеорологических систем приоритет отдается продукции с более высокими характеристиками оправдываемости прогнозов полей ветра по данным регулярного мониторинга их качества.

В качестве источников требуемой в зимний сезон информации о состоянии ледового покрова (общей сплоченности морского льда)

используются цифровые данные о распределении льдов, получаемые в результате совместного анализа данных спутниковых и контактных наблюдений в Мировом океане. Такие данные распространяются на регулярной основе через FTP-сервер Отдела моделирования и анализа морской среды NCEP/NOAA [12]. Распределение сплоченности льда, относящееся к моменту времени старта прогноза, переинтерполируется из исходной на сетку волновой модели и полагается не меняющимся со временем на всем прогностическом интервале.

2. Период испытаний, данные наблюдений и показатели качества прогнозов

Испытания проводились в период с 1.10.2014 г. по 30.09.2015 г. В ходе испытаний ежедневно составлялись прогнозы на сроки до 120 ч от исходного срока 00 ч ВСВ. Прогнозы составлялись в двух вариантах — с использованием метеорологических данных из моделей ПЛАВ и GFS. В качестве начальных условий для интегрирования волновой модели в каждом прогностическом сеансе использовались данные предшествующего прогноза спектров $N(f, \theta; \lambda, \phi, t)$ на 24 ч. Всего составлено 365 прогнозов.

Прогностические расчеты выполнялись на РСК Торнадо с периодичностью выдачи прогностических результатов 3 ч в качестве выходной продукции системы и 15 мин для определения показателей оправдываемости.

Качество прогнозов оценивалось путем сопоставления прогностических значений SWH с данными наблюдений двух типов: спутниковых (альтиметрических) измерений из базы данных RADS (Radar Altimeter Database System), поддерживаемой в Дельфтском институте исследований Земли из космоса (Delft Institute for Earth-Oriented Space research — DEOS) [18], и данных волновых буев (<http://www.ndbc.noaa.gov/>).

В период испытаний альтиметрические измерения регулярно поступали с трех спутников: Cryosat-2, Jason-2 и Saral. Для рассматриваемого годового периода из базы данных выбрано около 48 млн альтиметрических измерений SWH. Спутниковые данные по высоте ветровых волн имеют довольно высокую точность, сопоставимую с точностью контактных наблюдений, проводимых с помощью волновых буев (табл. 1).

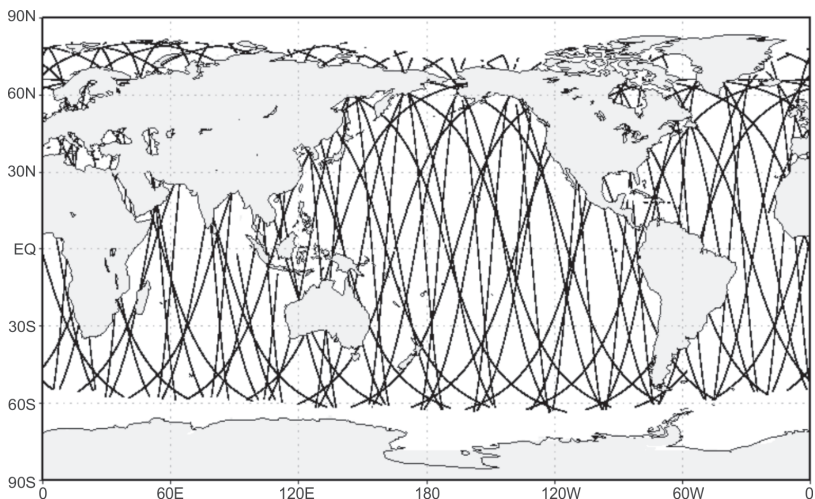
**Оценки точности альтиметрических данных о высоте ветровых волн
по литературным источникам**

Спутник	Район	Погрешность	Источник
Торех / Poseidon	Тихий океан у Японии	0,50–0,54 м	Ebuchi, Kawamura, 1994 [10]
Торех / Poseidon	У западного побережья Канады	0,30–0,35 м	Gower, 1996 [11]
Торех / Poseidon	Мексиканский залив	0,15–0,18 м	Hwang et al., 1998 [13]
ERS-1	Мировой океан	3–5 %	Tolman, 2002 [23]
Jason-1	Мировой океан	max (0,4 м, 10 %)	Picot et al., 2003 [16]
ERS-2, Торех/ Poseidon	Северное, Балтийское моря	0,3–0,4 м	Sølvsteen & Hansen, 2006 [19]
ERS-2, ENVISAT	Мировой океан	6–6,5 %	Janssen et al., 2007 [15]
Jason-1, Jason-2 ENVISAT RA-2	Мировой океан	около 5,4 %	Abdalla et al., 2010 [8]

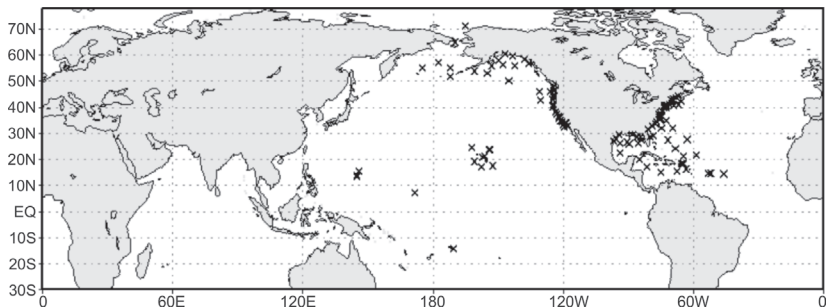
Данные второго типа наблюдений представляют собой выборки из рядов контактных измерений SWH на 120 волновых буях, установленных главным образом в Северном полушарии. Дискретность измерений на большинстве буев составляет 1 час, а номинальная точность 0,2 м. Примеры географического распределения данных обоих типов наблюдений представлены на рис. 1.

Для количественной оценки качества прогнозов высоты волн использовались такие показатели, как оправдываемость прогноза Опр, рассчитываемая в соответствии с Наставлением [3], а также средние ошибки: СО – средние отклонения прогностических значений от наблюдаемых (смещения), СКО – среднеквадратичные ошибки, Кор – коэффициенты корреляции между измеренными и прогностическими значениями.

Вначале для получения поточечных коллокаций «прогноз-наблюдение» применяется линейная пространственно-временная интерполяция прогностических полей SWH на точки и время измерений.



а)



б)

Рис. 1. Пример распределения альтиметрических измерений высоты волн для суточной порции данных наблюдений RADS за 30.09.2015 г. (а) и положение волновых буйев, данные которых использовались для оценки качества прогнозов в период испытаний 1.10.2014 г. – 30.09.2015 г. (б).

При этом каждому наблюдению ставится в соответствие несколько (до пяти) прогностических значений с разной заблаговременностью. Затем полученные таким образом разности прогностических и наблюдаемых значений группируются по суточным интервалам заблаговременности (0–24 ч, 24–48 ч, 48–72 ч, 72–96 ч, 96–120 ч), для которых

вычисляются перечисленные критерии оправдываемости прогнозов, характеризующие вариации точности прогнозов SWH от первых к пятым суткам прогноза.

3. Результаты испытаний

3.1. Оценки прогнозов относительно спутниковых и буйковых данных

Показатели качества прогнозов высоты волн, составленных с использованием метеорологических данных GFS за весь период испытаний 1.10.2014 г. – 30.09.2015 г. и оцениваемых относительно двух источников данных наблюдений, спутниковых и буйковых, представлены в табл. 2. Статистики, обозначаемые в строках «спутниковая альтиметрия», подсчитаны с использованием данных всех трех спутников Cryosat-2, Jason-2 и Saral, поставивших данные в базу RADS.

Таблица 2

Показатели качества прогнозов высоты волн SWH, составленных с использованием метеорологических данных GFS и оцениваемых относительно альтиметрических и буйковых данных за период 1.10.2014 г. – 30.09.2015 г.

Сутки прогноза	Наблюдательная система	Число сравнений, млн	СО, м	СКО, м	Кор	Опр, %
1	Спутниковая альтиметрия	48,580	0,23	0,53	0,94	88,3
	Волновые буи	1,007	0,13	0,47	0,90	90,2
2	Спутниковая альтиметрия	48,484	0,23	0,56	0,94	87,6
	Волновые буи	1,003	0,14	0,49	0,89	89,4
3	Спутниковая альтиметрия	48,309	0,23	0,61	0,92	86,3
	Волновые буи	1,001	0,14	0,52	0,88	88,3
4	Спутниковая альтиметрия	48,173	0,22	0,68	0,90	84,2
	Волновые буи	0,997	0,14	0,56	0,85	87,0
5	Спутниковая альтиметрия	48,033	0,21	0,78	0,86	81,3
	Волновые буи	0,993	0,14	0,61	0,82	85,1

Средние значения ошибок прогнозов (смещения) слабо зависели от заблаговременности, составляя 0,21–0,23 м и 0,13–0,14 м относительно спутниковых и буйковых данных соответственно. Преобладание положительных смещений свидетельствовало о систематическом завышении прогностических высот волн по отношению к измерениям обоих типов.

Среднеквадратичные ошибки SWH монотонно увеличивались с ростом заблаговременности от примерно 0,5 м для прогнозов на первые сутки до 0,6–0,8 м для прогнозов на пятые сутки. Среднеквадратичные ошибки относительно данных волновых буев были несколько ниже (примерно на 0,1 м), чем относительно альтиметрических данных.

Коэффициенты корреляции между прогностическими и измеренными значениями SWH имели довольно высокие значения (0,9 или больше) для малых заблаговременностей (1–3 суток), уменьшаясь до 0,82–0,86 на пятые сутки.

Рассчитываемая в соответствии с Наставлением [3] оправдываемость прогнозов монотонно уменьшалась с ростом заблаговременности, составляя 85–90 % при сопоставлении с данными контактных измерений и 81–88 % при сопоставлении со спутниковыми данными.

3.2. Зависимость от источника метеорологических данных

В табл. 3 представлены показатели качества прогнозов, составленных с использованием двух источников метеорологических данных, ПЛАВ и GFS, за период 15.03.2015 г. – 30.09.2015 г. Ошибки прогнозов подсчитывались относительно данных трех спутников – Cryosat-2, Jason-2 и Saral. Сравнение прогнозов, составленных с использованием разных метеорологических данных, позволяет сделать обоснованный выбор источника для получения наилучших прогнозов ветровых волн.

Как видно из табл. 3, смещение прогностических значений относительно наблюдений имеет разные знаки для прогнозов по ПЛАВ и GFS – систематическое завышение с данными GFS и систематическое занижение с данными ПЛАВ. В терминах среднеквадратических ошибок и коэффициента корреляции прогнозы по GFS получаются точнее, чем по ПЛАВ, тогда как оправдываемость по ПЛАВ оказывается более высокой, чем по GFS.

Показатели качества прогнозов высоты волн SWH, составленных с использованием двух источников метеорологических данных, ПЛАВ и GFS, и оцениваемых относительно альтиметрических данных за период 15.03.2015 г. – 30.09.2015 г.

Сутки прогноза	Источник данных	Число сравнений, млн	СО, м	СКО, м	Кор	Опр, %
1	ПЛАВ	26,479	-0,31	0,57	0,95	94,8
	GFS	26,479	0,21	0,52	0,95	89,6
2	ПЛАВ	26,336	-0,34	0,61	0,94	93,5
	GFS	26,478	0,21	0,55	0,94	88,9
3	ПЛАВ	26,196	-0,37	0,68	0,92	90,8
	GFS	26,476	0,21	0,61	0,93	87,5
4	ПЛАВ	26,057	-0,40	0,77	0,89	87,2
	GFS	26,473	0,22	0,69	0,90	85,2
5	ПЛАВ	25,919	-0,42	0,87	0,85	83,2
	GFS	264,698	0,22	0,79	0,87	82,1

В целом можно считать, что оба рассмотренных источника метеорологической информации обеспечивают сопоставимую точность прогнозов.

3.3. Сравнение с другими прогностическими системами

В Российской Федерации в настоящее время, помимо рассматриваемой, действует две системы прогноза ветрового волнения для океанских акваторий, прошедшие сертификацию Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП):

а) Оперативный глобальный прогноз волнения по модели ААНИИ (AARI-PD2). Решение ЦМКП от 16.05.2008 г. Прогноз составляется на сетке $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ с использованием данных метеорологического прогноза скорости ветра по спектральной модели T169L31.

б) Метод прогноза смешанного волнения на дальневосточных морях и в Тихом океане (Северное полушарие), разработанный в

ДВНИГМИ. Решение ЦМКП от 02.04.2009 г. Прогноз составляется на сетке $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ с использованием данных метеорологического прогноза атмосферного давления на уровне моря метеослужбы Великобритании.

Для первой из указанных систем (AARI-PD2) был получен набор статистик, аналогичный по составу и процедурам расчета рассмотренному выше набору для испытываемой системы. Поскольку в модели AARI-PD2 рассчитывается средняя высота волн, то для ее пересчета в SWH применялся коэффициент 1,6. Сравнение прогнозов по двум системам представлено в табл. 4. Показатели качества прогнозов в обоих случаях подсчитывались по отношению к альтиметрическим данным трех спутников – Cryosat-2, Jason-2 и Saral – за весь период испытаний 01.10.2014 г. – 30.09.2015 г.

Таблица 4

**Показатели качества прогнозов высоты волн SWH,
в двух прогностических системах: Гидрометцентра России и AARI-PD2
за период 01.10.2014 г. – 30.09.2015 г.**

Сутки прогноза	Прогностическая система	Число сравнений, млн	СО, м	СКО, м	Корр	Опр, %
1	ГМЦ	48,580	0,23	0,53	0,94	88,3
	AARI-PD2	49,644	-0,49	0,94	0,83	73,7
2	ГМЦ	48,444	0,23	0,56	0,94	87,6
	AARI-PD2	48,688	-0,49	1,00	0,79	71,3
3	ГМЦ	48,309	0,23	0,61	0,92	86,3
	AARI-PD2	47,447	-0,47	1,05	0,75	68,6
4	ГМЦ	48,173	0,22	0,68	0,90	84,2
	AARI-PD2	22,408	-0,45	1,10	0,72	66,9

Как видно из табл. 4, по всем показателям качество прогнозов рассматриваемой системы заметно выше, чем прогнозов AARI-PD2.

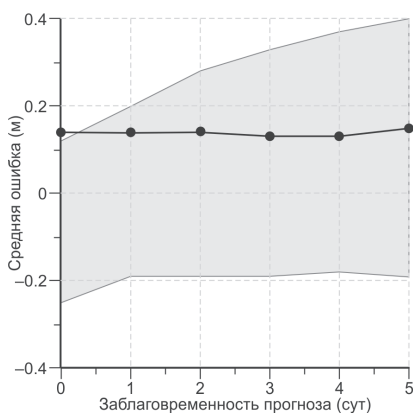
По данным публикации автора системы (б) [25], прогнозы SWH в северной части Тихого океана на сроки 12–72 ч характеризуются значениями СКО около 0,8 м и коэффициентами корреляции 0,73–0,75.

По этим показателям качество прогнозов рассматриваемой системы для указанной части Мирового океана также оказывается выше.

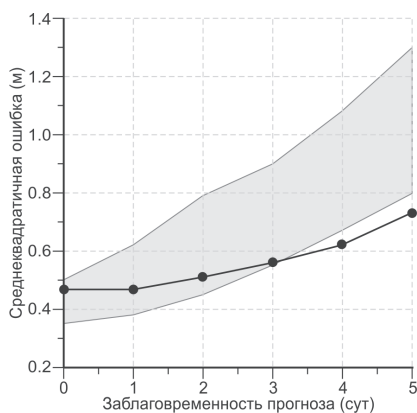
Для сопоставления точности прогностической продукции рассматриваемой системы и систем зарубежных центров удобно воспользоваться результатами мониторинга качества прогнозов ветрового волнения, проводимого Совместной комиссией (ВМО и МОК) по океанографии и морской метеорологии [9]. По принятой процедуре ежеквартально оцениваются показатели оправдываемости для фиксированных заблаговременностей прогнозов: 0, 24, 48, 72, 96 и 120 ч. В качестве эталона используются измерения на волновых буях, предварительно осредненные с 4-часовым временным окном, центрированным на моментах времени, соответствующих указанным прогностическим интервалам.

В соответствии с этим были рассчитаны по аналогичной процедуре величины CO , CKO и Kop на выборке прогнозов SWH рассматриваемой системы и данным волновых буев (рис. 1) за январь – март 2015 г., которые сопоставляются с результатами, приведенными в бюллетене [14] для других 10 систем.

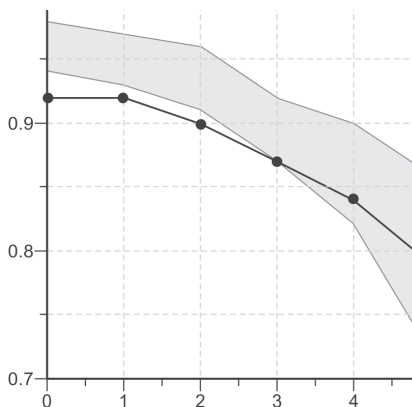
Сравнение с зарубежными системами прогнозирования ветрового волнения, показанное на рис. 2, свидетельствует о том, что показатели качества системы Гидрометцентра России в целом не уступают таковым для зарубежных систем.



2а



2б



2в

Рис. 2. Зависимость смещения (а), среднеквадратического отклонения (б) и коэффициента корреляции (в) от заблаговременности прогноза SWH для системы Гидрометцентра России (линия) и диапазон изменчивости указанных характеристик по данным [14] для 10 моделей зарубежных центров (заливка).

Заключение

На основе рассмотрения результатов испытаний на своем заседании 28.03.2016 г. ЦМКП Росгидромета рекомендовала «Систему прогнозирования характеристик ветрового волнения в Мировом океане» к использованию в качестве основной технологии прогнозирования характеристик ветрового волнения в Мировом океане, отметив, что эта система является существенным развитием комплексной технологии оперативного прогнозирования ветрового волнения в океанах и морях России (решения ЦМКП от 27.03.2012 г. и 17.06.2013 г.), а также то, что получаемая прогностическая продукция, наряду с непосредственным использованием, обеспечивает получение информации, необходимой для встраиваемых подсистем детализированного прогноза волнения в окраинных морях Российской Федерации.

Информационная продукция прогностической системы распространяется на регулярной основе посредством интернет-технологий: в цифровом виде — через систему распределенных баз данных ЕСИМО и в графической форме через сайт <http://hmc.meteorol.ru/sea/index.html>. Соответствующее веб-приложение дает возможность просматривать «мгновенные» поля основных параметров ветрового волнения на интервале прогноза 0–120 ч с дискретностью 3 ч, а также их анимацию как для всего Мирового океана, так и для его частей.

Список литературы

1. Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды ГОИН. Исследования океанов и морей. – 2014. – Вып. 215. – С. 90–101.
2. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. – СПб: Гидрометеоиздат, 1998. – 499 с.
3. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада ЛТД, 2011. – 201 с.
4. Справочные данные по режиму ветра и волнения шельфа Баренцева и Карского морей. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2013. – 334 с.
5. Струков Б.С., Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытания для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний. – 2013. – С. 64–79.
6. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 4. – С. 5–16.
7. Amante C., 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. – doi:10.7289/V5C8276M.
8. Abdalla S., Janssen P. A.E.M., Bidlot J.-R. Jason-2 OGDR Wind and Wave Products: Monitoring, Validation and Assimilation // Marine Geodesy. – 2010. – Vol. 33. Suppl. 1. – P. 239–255. – DOI: 10.1080/01490419.2010.487798.
9. Bidlot J.R., Holt M.W. Verification of operational global and regional wave forecasting systems against measurements from moored buoys // JCOMM Technical Report No. 30. – 2006. – 15 p.
10. Ebuchi N., Kawamura H. Validation of wind speeds and significant wave heights observed by the TOPEX altimeter around Japan // Journal of Oceanography. – 1994. – Vol. 50(4). – P. 479–487.
11. Gower J.F.R. Intercalibration of wave and wind data from TOPEX/POSEIDON and moored buoys off the west coast of Canada // J. Geoph. Res. – 1996. – Vol. 101 (C2). – P. 3817–3829.
12. Grumbine R.W. Automated Passive Microwave sea ice concentration analysis at NCEP // NCEP/NOAA. Technical Note No 120. – 1996. – 13 p.
13. Hwang P.A., Teague W.J., Jacobs G.A., Wang D.W. A statistical comparison of wind speed, wave height and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region // J. Geoph. Res. – 1998. – Vol. 103. – P. 10451–10468.
14. Intercomparison of operational wave forecasting systems against buoys: January 2015 to March 2015 JCOMM. May 2015. – <http://www.jcomm.info>
15. Janssen P.A.E.M., Abdalla S., Hersbach H., Bidlot J.-R. Error Estimation of Buoy, Satellite, and Model Wave Height Data // J. Atmos. Oceanic Technol. – 2007. – Vol. 24. – P. 1665–1677.

16. *Picot N., Case K., Desai S., Vincent P.* “AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products”, SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D-21352 (PODAAC). – 2003. – 107 p.
17. Product Description Document: NCEP Model Analyses & Guidance. July 2013. Available at http://products.weather.gov/PDD/NCEP_PDD_MAG.pdf
18. *Scharroo R., Leuliette E.W., Lillibridge J.L., Byrne D., Naeije M.C., Mitchum G.T.* RADS: Consistent multi-mission products // Proc. of the Symposium on 20 Years of Progress in Radar Altimetry, Venice, 20–28 September 2012, Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-710. – 2013. – 4 p.
19. *Sølvsteen C., Hansen C.* Validation of the operational wave models WAVEWATCH-III and Mike21-OSW against satellite altimetry and coastal buoys FARVANDSVÆSENET Royal Danish Administration of navigation and Hydrography NR K.4. – March 2006. – 52 p.
20. *Strukov B.S., Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L.* Verification of the Wind Wave Forecasting System for the Black, Azov and Caspian Seas // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. – Report No. 42. – May 2012. – P. 08-05–08-06.
21. The SWAN team, SWAN user manual. – 2010. – <http://www.swan.tudelft.nl>.
22. *Tolman H.L.* Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain // NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note No 213. – 2002. – 33 p.
23. *Tolman H.L.* Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note Nr. 213. – 2002. – 33 p.
24. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14 // NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note No 276. – 2009. – 194 p. Available at <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>.
25. *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. – P. 5–9.
26. 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., Ewing J.A.* The WAM model – a third generation ocean wave prediction model // J. Phys. Oceanogr. – 1988. – Vol. 18. – P. 1775–1810.
27. *Weatherall P., Marks K.M., Jakobsson M., Schmitt T., Tani S., Arndt J.E., Rovere M., Chayes D., Ferrini V., Wigley R.* A new digital bathymetric model of the world’s oceans // Earth and Space Science. – 2015. – Vol. 2. – P. 331–345. – doi: 10.1002/2015EA000107.
28. *Wessel P., Smith W.H.F.* A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // J. Geophys. Res. – 1996. – Vol. 101 (B4). – P. 8741–8743.
29. *Zelenko A.A., Strukov B.S., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L.* Verification of the wind wave forecasting system for the Baltic sea // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. – WCRP Report No. 12/2015. – 2015. – P. 8-23–8-24.