

УДК 551.466.3

Усовершенствованная система прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане: результаты испытаний

Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зайченко М.Ю.

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия*

Представлены результаты испытаний подсистемы глобальных пятисуточных прогнозов ветрового волнения, выпускаемых в рамках комплексной системы прогнозирования ветрового волнения, созданной в Гидрометцентре России в рамках темы 1.1.10 «Разработка и усовершенствование моделей, методов и технологий прогнозирования гидрометеорологических характеристик акваторий Мирового океана, морей и морских устьев рек России» (2020–2024 гг.). Комплексная система построена по сопряженной схеме «океан – море – прибрежная зона» на базе высокопроизводительной вычислительной платформы Gray XC40-LC и последних версий волновой модели Wave Watch-III и предназначена для выпуска прогнозов по акваториям как Мирового океана, так и всех российских морей. Новая прогностическая система в части глобальных прогнозов призвана заменить действующую с 2016 г. технологию прогнозирования характеристик ветрового волнения в Мировом океане (решение ЦМКП от 21.03.2016). Оценки качества прогнозов значительной высоты волны на пять суток свидетельствуют о том, что представленная усовершенствованная версия прогностической системы по показателям успешности прогнозов заметно превосходит предшествующую технологию. Показатели качества прогнозов в терминах смещения, среднеквадратичной ошибки и индекса рассеяния сопоставимы с таковыми для известных по литературным источникам зарубежных систем.

Технологическая схема прогностического метода

В качестве основного вычислительного звена в новой системе прогнозирования ветрового волнения используется последняя на время разработки системы версия спектральной модели третьего поколения WAWEWATCH-III 6.07.1 (далее WW3), описывающая эволюцию волновых характеристик на прогностических интервалах времени.

Расчетные модельные области, аппроксимирующие конфигурацию берегов и батиметрию реальных океанических и морских бассейнов, в прогностической системе сформированы в виде набора взаимосогласованных сеток [1]. Они строились на базе известных цифровых массивов данных батиметрии: ETOPO1 [3] и GEBCO 2020 [6]. Сеточная конфигурация океанской модели, в отличие от прежней прогностической системы, строится путём совмещения регулярной географической сетки в низких и средних широтах с криволинейными приполярными сетками, формирующимися в стереографической проекции. 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. Разрешение в спектральном пространстве задавалось 25 частотами в диапазоне 0,042–0,414 Гц и 36 направлениями распространения волн с шагом 10°.

Атмосферный форсинг волновой модели формировался на базе оперативной продукции прогностической системы GFS (NCEP/NOAA) с пространственным разрешением около 13 км и временной дискретностью 3 часа. В качестве начальных условий для интегрирования волновой модели в каждом прогностическом сеансе использовались данные предшествующего прогноза спектров на 24 часа.

Ежедневные прогностические расчеты характеристик ветрового волнения производились в оперативном порядке на вычислительном комплексе Cray XL40 в режиме параллельных вычислений с использованием технологии MPI. Прогнозы для Мирового океана составлялись в рамках единой вычислительной задачи, в которой обеспечивалось двустороннее взаимодействие расчетных сеток для полярных областей с сеткой для тропических и средних широт океана. Для своевременного получения прогностической продукции задействовалось 576 вычислительных ядер.

Результаты верификации прогнозов

Испытания усовершенствованной системы прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане проводились в соответствии с Программой испытаний в период с 1 февраля по 30 сентября 2024 года. Объектом испытаний являлись ежедневные прогнозы волнения на пять суток вперед от стартового срока 00 ч ВСВ.

В базовый набор статистических оценок, вычисляемых для высоты значительных волн (*SWH*), входят средняя ошибка или смещение (*BIAS*), среднеквадратическая ошибка (*RMSE*), индекс рассеяния (*SI*), коэффициент корреляции (*COR*) и общая оправдываемость прогнозов (*OPR*). Эти показатели рассчитывались по набору точечных коллокаций наблюдение-прогноз, для которых прогностическое значение определялось линейной интерполяцией сеточных полей в точку в момент наблюдения. В качестве контрольных данных использовалась глобальная сводка альтиметрических измерений высоты значительных волн [5], выполняемых в составе девяти, действующих в настоящее время, спутниковых миссий. В табл. 1 представлены совокупные за период испытаний оценки качества прогнозов разной заблаговременности для высоты значительных волн *SWH*. При расчетах оценочных статистик формировались выборки для пяти суточных интервалов заблаговременностей прогноза – от первых до пятых суток.

Таблица 1. Обобщенные за период испытаний показатели точности прогнозов высоты значительных волн

Оценка	Заблаговременность прогноза (сутки)				
	1	2	3	4	5
<i>BIAS</i> (м)	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06
<i>RMSE</i> (м)	0,39	0,41	0,47	0,54	0,65
<i>SI</i> (%)	14,8	15,6	17,6	20,6	24,6
<i>COR</i>	0,96	0,96	0,95	0,93	0,90
<i>OPR</i> (%)	96,0	95,3	93,7	91,1	87,7

Под эгидой ВМО проводится регулярный мониторинг точности продукции около 10 основных прогностических систем ветрового волнения в Мировом океане на основе наблюдений, поступающих с волновых буёв. Последние из доступных результатов мониторинга относятся к периоду март–май 2024 г. [4]. В табл. 2 представлено сопоставление этих результатов с нашими оценками прогнозов по северным экстра-тропикам (основная часть волновых буёв размещена в этих широтах) за этот же период.

Таблица 2. Сопоставление оценок прогнозов SWH усовершенствованной прогностической системы и диапазона разброса оценок для 12 зарубежных моделей (северные экстра-тропики, март–май 2024 г.)

Оценка для SWH	Заблаговременность прогноза (сутки)				
	1	2	3	4	5
<i>BIAS</i> (см)	6 -3 ... 14	6 -2 ... 17	5 -3 ... 18	5 -2 ... 18	6 -3 ... 17
<i>SI</i> (%)	15 16 ... 20	16 18 ... 22	18 22 ... 27	21 25 ... 31	25 28 ... 34

При анализе таблицы следует учитывать, что в [4] в качестве контрольных данных используются контактные измерения SWH на волновых буях, размещенных главным образом на небольшом удалении от берегов, тогда как данные спутниковых альтиметрических наблюдений сравнительно равномерно распределены по акватории океана. Тем не менее эти результаты показывают, что оценки для рассматриваемых систем сопоставимы между собой.

Заключение

Представленные глобальные прогнозы выпускаются в рамках комплексной системы прогнозирования ветрового волнения, разработанной по сопряженной технологии “океан – море – прибрежная зона” [1], которая представляет собой существенное развитие предшествующей версии оперативной прогностической системы [2]. Результаты испытаний показали, что оценки точности прогнозов высоты значительных волн для Мирового океана в усовершенствованной прогностической системе превосходят оценки для предшествующей системы и являются сопоставимыми с оценками прогнозов зарубежных центров.

На основе рассмотрения результатов испытаний **Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета** на заседании 20.12.2024 рекомендовала «Усовершенствованную систему прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане» к использованию в Гидрометцентре России в качестве основного прогностического метода для ветрового волнения в Мировом океане.

Список литературы

1. Зеленько А.А., Мысленков С.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зайченко М.Ю. Комплексная система прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Метеорология и гидрология. 2024. № 8. С. 20-34.

2. 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.

3. 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.

4. Intercomparison of operational wave forecasting systems against in-situ observations for MAM 2023 - 00UTC runs only, Part I: Significant wave height. — WMO Lead Centre for Wave Forecast Verification. 2024. ECMWF. 61p; <https://confluence.ecmwf.int/display/WLW/Significant+wave+height>

5. Mertz F., Husson R., Taburet N., Charles T., 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>

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